



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria  
de Manresa



# Estudio mineralógico y geotécnico de la mina FIDAMI (Perú)

---

## Grado en Ingeniería Minera

**Lidia Lozano Calvo**

**Manresa, 28 de Julio de 2018**

**Directoras: Pura Alfonso Abella y María Teresa Yubero de Mateo**

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a l'ONG Minería per al Desenvolupament (MPD), que me dio la oportunidad de participar en un proyecto de cooperación minera, al Centre de Cooperació per al Desenvolupament (CCD) y a Alianza por la Minería Responsable (ARM) por la ayuda económica para que pudiera desarrollar este proyecto.

Agradecer a mis tutoras, Pura y Tere, por enseñarme todo lo que saben, por guiarme para realizar un buen proyecto y por implicarse tanto con él.

A mi familia y amigos, por todo su apoyo y soporte durante este periodo académico y por animarme a aprovechar todas las oportunidades de viajar y aprender.

A mis compañeros de universidad, que me llevo como amigos, por su compañía, su comprensión y por estos 4 años juntos.

## Índice

Agradecimientos	2
Resumen	5
Abstract	7
1. Introducción	9
2. Objetivos	10
2.1 Objetivos generales	10
2.2 Objetivos específicos	10
3. Antecedentes	11
4. Situación geográfica	12
5. Geología	13
5.1 Geología del Perú	13
5.2 Geología del área de estudio	16
6. Metodología	19
6.1 Muestreo	19
6.2 Composición química	19
6.3 Confección de probetas para observación al microscopio	19
6.4 Composición mineralógica	21
6.5 Procesamiento	22
6.5.1 Granulometría	22
6.5.2 Ensayo de pH en pasta	22
6.6 Estudio geotécnico	23
6.6.1 Resistencia a la compresión simple	23
6.6.2 Ensayo de carga puntual	23
6.6.3 Estudio de discontinuidades	24
7. Proceso productivo	25
7.1 Explotación de mineral	25
7.2 Procesamiento del mineral	25
7.2.1 Reducción del tamaño	26
7.2.2 Cianuración y lixiviación	27
8. Resultados	28
8.1 Rocas encajantes	28
8.2 Composición mineralógica	28
8.3 Leyes de las mineralizaciones y materiales tratados	31
8.4 Estudio del procesamiento	32
8.4.1 Composición química	32

8.4.2 Granulometría de las pulpas	33
8.4.3 Acidez de las soluciones cianuradas	34
8.4.4 Nueva propuesta de procesamiento	34
8.5 Estudio geotécnico	35
8.5.1 Discontinuidades	36
8.5.2 Compresión simple y carga puntual	37
8.6 Riesgos laborales y ambientales	39
9. Conclusiones	41
10. Bibliografía	43
Anexos	45
Anexo 1: Listado de muestras y estudio realizado	45
Anexo 2: Lista de discontinuidades medidas en la galería Ana	47
Anexo 3: Resultados compresión simple: ensayos en laboratorio Optimore, EPSEM	48
Anexo 4: Resultados carga puntual: ensayos en laboratorio de Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)	53
Anexo 5: Listado de probetas	55
Anexo 6: Microscopia electrónica	56

## Resumen

El presente trabajo recoge un estudio de los materiales de la zona minera de San Luís (Perú), donde se ubican las minas de FIDAMI y San Luís Alta con la finalidad de mejora, por un lado de la recuperación del oro en la planta de procesamiento y por otro lado la seguridad en las minas.

El contenido de oro se analizó a partir de las muestras de vetas y también a partir de los relaves de la planta de procesamiento. Se utilizó SEM para obtener información sobre la composición química y textura del oro y los minerales que lo acompañan. El método de pasta de pH se usó para conocer la acidez de los fluidos durante el proceso de cianuración. Para llevar a cabo el estudio geotécnico se midió las discontinuidades en el campo y se determinó la resistencia a la compresión en todos los materiales del área.

En ambas minas el material explotado es oro, el cual, se encuentra acompañado de cuarzo y dispuesto en vetas paralelas con una potencia inferior a 1m. El oro se encuentra en ocasiones acompañado de sulfuros, de óxidos de Fe o simplemente con el cuarzo.

Para la mejora de la recuperación de oro en la planta de procesamiento se ha analizado el contenido en oro de varias vetas, obteniéndose 40g/t y 63 g/t en las principales vetas explotadas. En los residuos actuales del procesamiento de la planta de San Luís se ha observado que no queda prácticamente oro, en cambio en los residuos procedentes de análisis de años anteriores, se han observado elevados contenidos de oro. Por otro lado, las colas de procesamiento de FIDAMI contienen casi el 50% del total del oro del material sin procesar.

En San Luís el oro, además de como metal nativo, se encuentra en gran parte formando telururos de oro; en FIDAMI estos son poco abundantes hallándose el oro principalmente encapsulado en cuarzo.

El método de procesamiento en las plantas de ambas minas es por cianuración, sin embargo, en San Luís en las piscinas de cianuración juntamente con el material triturado añaden cemento, lo que hace que en ellas exista un pH elevado, que favorece los efectos del proceso de cianuración en el caso de la presencia de telururos u oro encapsulado en silicatos.

Para la mejora de seguridad de la mina se han realizado varios ensayos de compresión simple y de carga puntual para determinar la resistencia máxima admisible

de la roca matriz, donde se ubica la mina. Además, se han estudiado las dos familias de discontinuidades de FIDAMI, la primera con una media de  $328/58^{\circ}$  NE y la segunda de  $3/77^{\circ}$  NW, que se han generado en el macizo rocoso. Estas familias, han sido representadas mediante la proyección estereográfica para conocer si las galerías excavadas en el macizo rocoso son estables o no y los posibles problemas que puedan generarse en ella.

La resistencia a la compresión indica que la roca es resistente la actividad de la mina y la seguridad dentro de la mina es favorable ya que la proyección estereográfica nos indica que no sigue la dirección de las discontinuidades.

## Abstract

The present work includes a study of the materials of the mining area of San Luis (Peru), where the FIDAMI and San Luis Alta mines are located with the purpose of improvement, on the one hand of the gold recovery in the processing plant and on the other hand security in the mines.

The gold content was analyzed from the vein samples and also from the tailings of the processing plant. SEM was used to obtain information of the chemistry and texture of gold and accompanying minerals. The pH paste method was used to know the acidity of the fluids during the cyanidation process. To carry out the geotechnical study the discontinuities were measured in the field and the resistance to compression was determined in all the materials from the area.

In both mines a set of gold veins is exploited, parallel in a power inferior to 1m and filled mainly with quartz. Gold is sometimes accompanied by sulfides, oxides of iron or simply with quartz.

To improve the gold recovery in the processing plant, the gold content of the main veins has been analyzed, obtaining 40g per ton and 63g per ton in the main veins exploited. In the present residues of the processing of the plant of San Luis there is practically no gold, however there is some of it in the roots of other previous periods if there were left behind gold volumes. The FIDAMI processing queues contain almost 50% of the total gold of the raw material.

In San Luis the gold, in addition to being a native metal, is to a large extent forming gold tellurides; in FIDAMI these are not abundant, gold being mainly encapsulated in quartz.

The method of processing in the joints plants is by cyanidation, however, it is San Luis in the cyanidation pools together with the material crushed and add cement, which makes the mix have a high pH, which enhances the effects of Cyanidation process in the case of the presence of tellurides or gold encapsulated in silicates.

To improve the security of the mine, a simple compression test and point load has been carried out to determine the hardness of the rock mass. The discontinuities of the veins, the first with 328/58° NE and the second 3/77 NW, that form the deposit through the stereographic projection have been studied to determine the situation of the mine and the possible infrastructure problems that may occur.

The compressive strength indicates that the rock is resistant to the activity of the mine and the safety inside the mine is favorable that the results of the stereographic projection indicate that it does not follow the direction of the discontinuities.



## 1. Introducció

La minería artesanal es aquella donde la actividad se lleva a cabo por personas individuales o pequeños colectivos, a menudo de manera informal. El volumen generado de venta no es elevado y el material suele ser vendido en un mercado no legal ya que no reúnen los certificados necesarios para que su actividad sea legal. Este tipo de actividad se realiza sobre todo en países ricos en recursos minerales pero que todavía se encuentran en vías de desarrollo, como son algunos países de sud américa, áfrica o el sud-este asiático. Como la cantidad de personas que realizan este tipo de minería es elevado, los respectivos gobiernos han visto necesario la integración de esta actividad en las leyes y legislación de cada país y por lo tanto la legalización de esta pero todavía no son muchas las empresas y/o organizaciones que lo han conseguido.

Actualmente la actividad minera, ya sea a grande escala o minería artesanal, requiere de un desarrollo sostenible para mantener el equilibrio en un futuro. Este equilibrio se basa en aspectos económicos, medioambientales y sociales. En los países más desarrollados éste equilibrio acostumbra a estar presente pero en países en vías de desarrollo a menudo no lo está. Se tiene en cuenta que al tratarse de países en vías de desarrollo, la tecnología empleada no es la misma que en países desarrollados y por lo tanto no se tiene en cuenta el equilibrio medioambiental.

Actualmente existen organizaciones sin ánimo de lucro, como es el caso de ARM (Alianza por la Minería Responsable), que tienen la finalidad de que estas pequeñas empresas mineras consigan desarrollar una actividad sostenible y que, de este modo, consigan certificados de que están realizando una labor sostenible, lo que les permitirá vender su producto en un mercado justo.

Este estudio se centra en la minería de la población de Nueva Jerusalén, en el sur de Perú, llevada a cabo por la cooperativa minera FIDAMI, con el objetivo de mejorar sus condiciones técnicas y laborales para que puedan llegar a conseguir el certificado del comercio justo del oro. Esta cooperativa explota oro en una mina de un yacimiento de vetas paralelas. Cuentan con poco conocimiento de la geología del yacimiento y no conocen las características mineralógicas del material que explotan. El proceso de extracción del oro se lleva a cabo mediante cianuración.

Para tener una información más regional se completó el estudio con muestras obtenidas en una mina ubicada a un par de km, se trata de la mina de San Luis Alta.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivos generales**

Este estudio tiene la finalidad de realizar acciones para mejorar las condiciones de trabajo de la mina de FIDAMI y así, que puedan obtener el certificado de comercio justo del oro y determinara el nivel de recuperación del oro que tiene actualmente la mina y qué posibilidades hay de incrementarlo.

### **2.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos del estudio tratan de:

- Realizar una medición de las discontinuidades presentes en la mina (fallas, diaclasas...) para determinar las condiciones geotecnicas de la mina.
- Realizar una caracterización del macizo rocoso donde se sitúa la infraestructura de la mina.
- Realizar un muestreo representativo en la mina y afloramientos de los alrededores para determinar que minerales se explotan, y determinar la ley del oro y las características de liberación.
- Determinar el porcentaje de recuperación del oro que tienen.
- Proponer, si procede, cambios en el modo de procesamiento para mejorar el grado de recuperación del oro durante el procesamiento.

### 3. Antecedentes

En los últimos años, el precio de los metales, y en concreto del oro, ha incrementado notablemente. Perú, se ubica entre las 10 potencias de producción de oro del mundo. Una parte significativa de este oro, entre el 15 y el 20% (Bessombes, 2013) lo obtienen a partir de la minería artesanal y pequeña minería.

Esta minería, para poder entrar en el mercado justo de venta del oro precisa de un certificado de minería justa (FairMined) que confirme que su práctica es ambientalmente, socialmente y económicamente sostenible.

Este certificado fue creado por la Alianza de Minería Responsable, una iniciativa global sin ánimo de lucro con el fin de mejorar la equidad y el bienestar de la minería artesanal y convertirla en una actividad organizada, formalizada y rentable.

Además, la obtención de este certificado confirma que la actividad minera realizada para la extracción del oro que el consumidor compra, sea sostenible con el medio ambiente, con una equidad social de los trabajadores y con unas buenas condiciones de trabajo. Por ello, la empresa FIDAMI está cambiando su método de trabajo para conseguir la obtención de este certificado que les abrirá las puertas al comercio justo del oro y poder crecer y desarrollarse en un futuro.

#### 4. Situación geográfica

La mina FIDAMI se sitúa junto en un poblado minero llamado Nueva Jerusalén que se encuentra adosado a Santa Filomena, dentro del departamento de Ayacucho, en la provincia de Lucanas, distrito de Sancos, al sur del Perú (Fig. 1). La mina de FIDAMI se encuentra cerca de la mina de San Luis y su poblado, San Luis Alta, y cada una se sitúa en laderas opuestas separadas por la falla Castellana. Se sitúan sobre los 2.500m de altura en la cadena montañosa de los Andes.

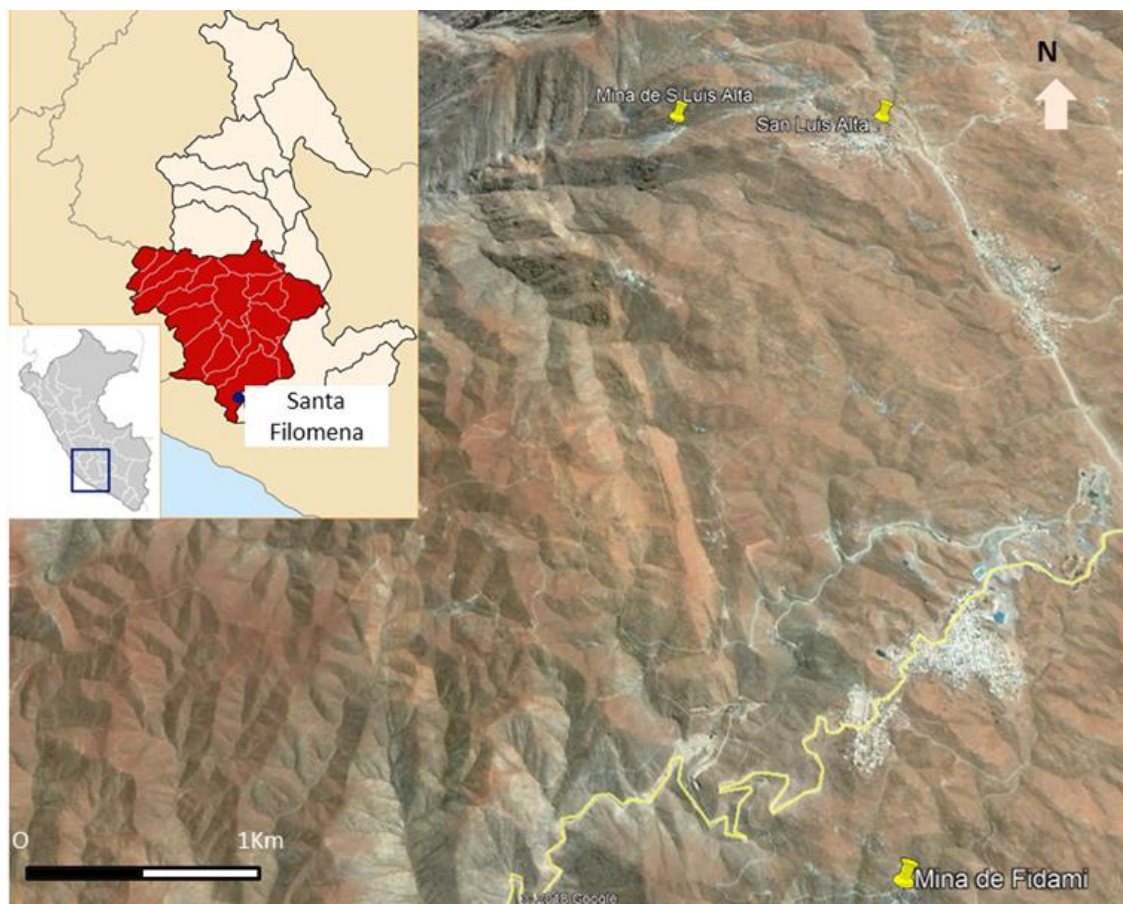


Fig. 1 - Ubicación de la mina FIDAMI en el distrito de Sancos, provincia de Lucanas y departamento de Ayacucho.

## 5. Geología

### 5.1. Geología del Perú

La mayor parte del territorio Peruano la forma la cordillera de los Andes, la cual se extiende de Norte a Sur por toda América del Sud. Esta Cordillera forma en el territorio peruano diferentes unidades geomorfológicas generadas por la existencia de fallas recientes, pliegues situados en la Cuenca de Huancayo, levantamientos de superficie y como resultado de la actividad sísmica y volcánica de la zona (Palacios Moncayo, 1995). Ubicadas de Este a Oeste la forman: Cordillera de la Costa, Llanura Preandina, Cordillera occidental, Depresiones Interandinas, Cordillera Oriental, Cuenca del Titicaca, Región Subandina, Llanura Amazónica.

De todas ellas, en este trabajo únicamente se hará referencia al Batolito de la Costa, ya que es donde se halla la zona de estudio.

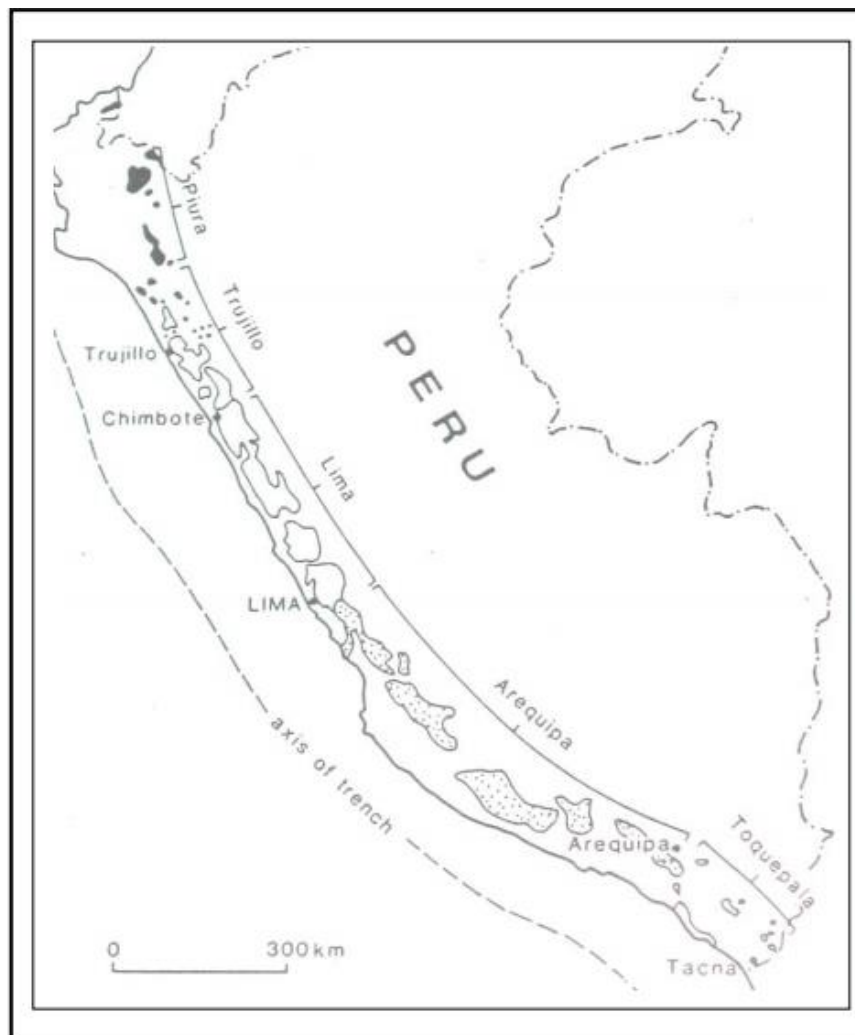
El batolito de la costa se le denomina al conjunto de intrusiones de diferentes tamaños que se encuentran a lo largo de la costa Peruana. El batolito se extiende en un área de 1600km de largo y 60km de ancho. El batolito se divide en cinco segmentos: Piura, Trujillo, Lima, Arequipa y Toquepala (Ptcher, 1985) (Fig. 2) que a su vez se dividen en las super unidades Pampahuasi, Linga, Incahuasi, Tiabaya i la de Pataz.

Se distinguen 3 etapas de intrusión. a) Primera etapa de intrusión entre 105 a 90 Ma, relacionada con depósitos volcano sedimentarias del grupo Casma. b) Segunda etapa de intrusión entre 90 a 70 Ma, no poseen depósitos volcánicos contemporáneos c) Tercera etapa de intrusión entre 70 a 60 Ma, relacionado con depósitos volcano sedimentarios del cretácico superior (Pitcher, 1985).

La zona de estudio se encuentra en el segmento de Arequipa. Este segmento se divide a su vez en seis sectores, que de norte a sur son: sector I Ica, sector II Palpa-Nazca, sector IV Jaqui Chala Cháparra, sector IV Ocoña, sector V Chuquibamba y sector VI La Joya. San Luís y FIDAMI pertenecen al sector de Jaqui Chala Cháparra.

La litología en el segmento de Arequipa varía de diorita a monzogranito, pero es más común la presencia de granodiorita. Los plutones son de varios tamaños y bastante homogéneos, aunque también los hay zonados. Se la super unidad más tardía de edad de 81 Ma (Cobbing, 1982). Las rocas encajantes son de tonalitas a monzogranitos, y algunos afloramientos de granodioritas. Esta super unidad se caracteriza por dos unidades principales con granodioritas que contienen grandes

cantidades de hornblenda y biotita: rocas de grano grueso y rocas de grano medio al oeste (Moore y Agar, 1985).



**Fig. 2 - Mapa segmentado de las cinco unidades del Batolito de la Costa y distribución de los plutones (Pitcher, 1985)**

Desde el punto de vista metalogénico se diferencian varias fajas. Las minas estudiadas se encuentran en el grupo de la faja de los depósitos relacionados con intrusivos (Figura 3), al que pertenecen otros depósitos relativamente importantes del área y estudiados previamente en otros trabajos prestándose la Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa, como el de Misky (Palacios, 2011) y Cháparra (Yáñez González, 2013). Éste último ha sido clasificado como de tipo Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG). A esta tipología pertenecen algunos grandes depósitos cercanos a los de estudio, como son los de Marcona y Mina Justa.



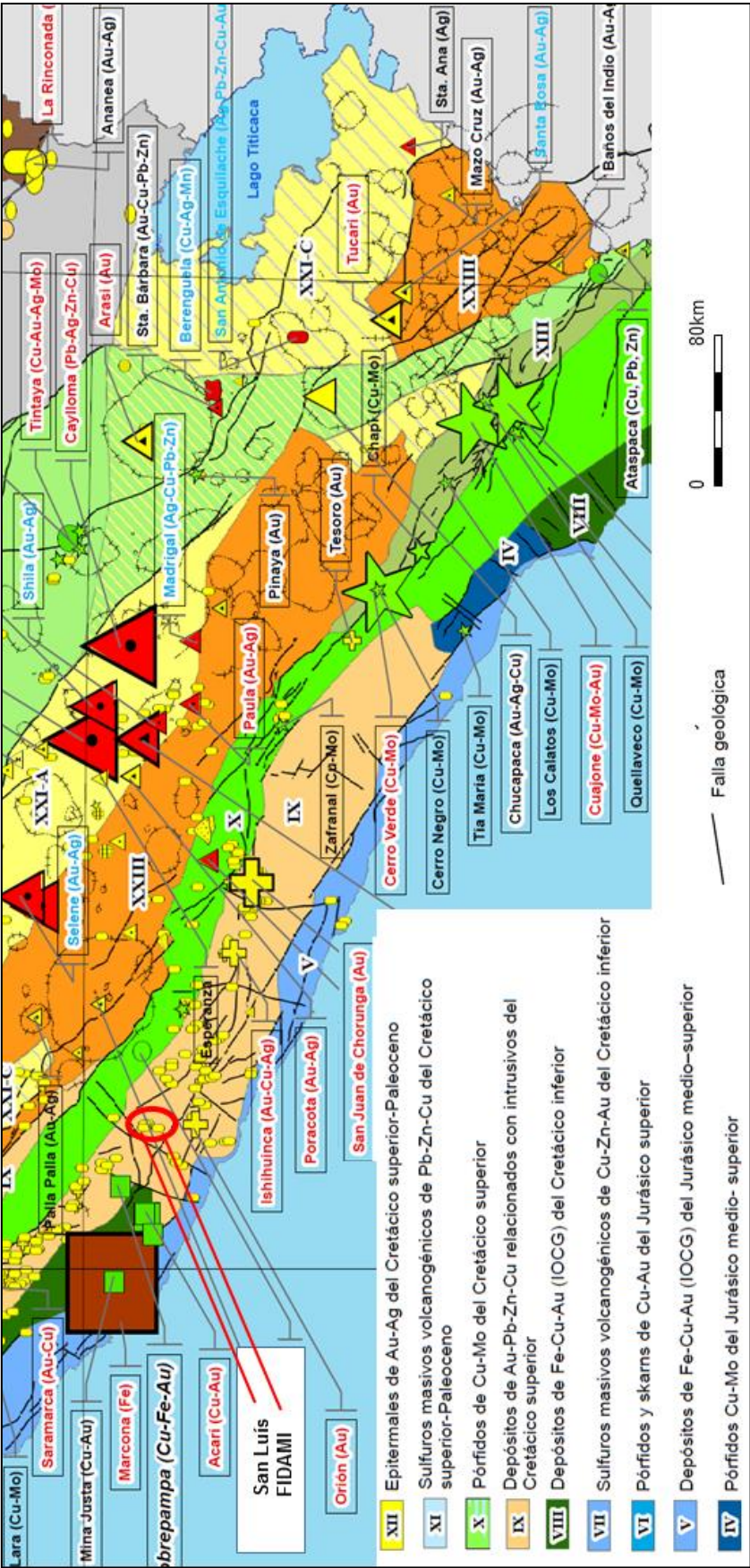


Figura 3 - Mapa metalogénico del área de estudio (INGEMET) (Acosta et al., 2014), con la ubicación de los yacimientos principales.

## 5.2. Geología del área de estudio

Las minas de San Luís y de FIDAMI se encuentran emplazadas en la super unidad de Tiabaya y Complejo santa Rita (Fig. 4).

- Súper-unidad Tiabaya. Es la súper-unidad de mayor ocurrencia y la más tardía de todas ellas con una edad de 81 Ma (Moore et al., 1985). En ella afloran algunas granodioritas y su composición varia de proporción de tonalita a monzogranito aunque también se pueden observar facies de pórfidos granodioríticos de grano grueso.
- Complejo Santa Rita. El complejo es fruto del metamorfismo entre las super-unidades Linga y Tiabaya y en general trata de rocas metamórficas de color gris oscuro con contactos intrusivos verticales encontrando esquistos con sillimanita, intrusivos gneisificados, hornfels volcánicos y sedimentarios, metasomatitas, dioritas piroxénicas y microgabros hornfelsicos.

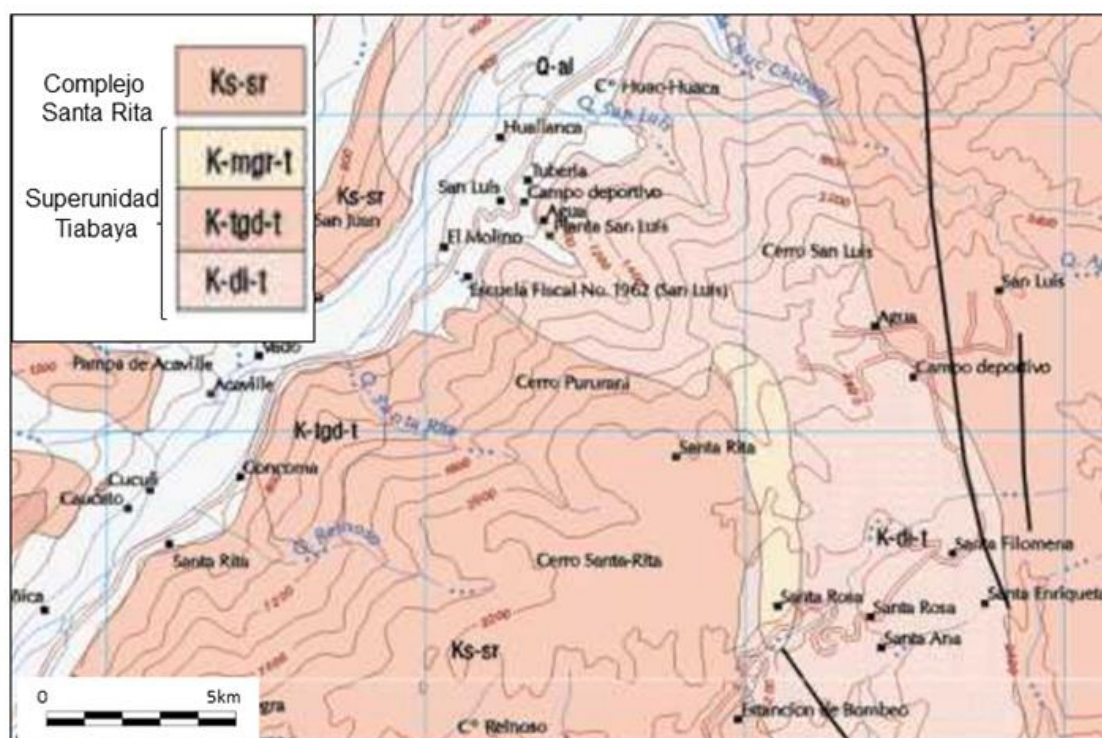


Fig. 4 - Mapa geológico de la ubicación de las minas de FIDAMI (Santa Filomena) y San Luis Alta.

Como se puede ver, la mina de San Luís Alta está ubicada en la formación Santa Rita y la mina de FIDAMI (Santa Filomena) se encuentra justo en el límite de las dos super unidades de Tiabaya y Santa Rita. En el caso de FIDAMI, las vetas que forman la mina afloran en superficie pudiendo ver su dirección a simple vista (Fig. 5). Las vetas



traviesan tres fallas de la zona y la última veta se encuentra en el límite de las dos super unidades. Como se puede observar, las vetas son paralelas entre ellas y la veta con más potencia de mineral es también la veta más extensa.

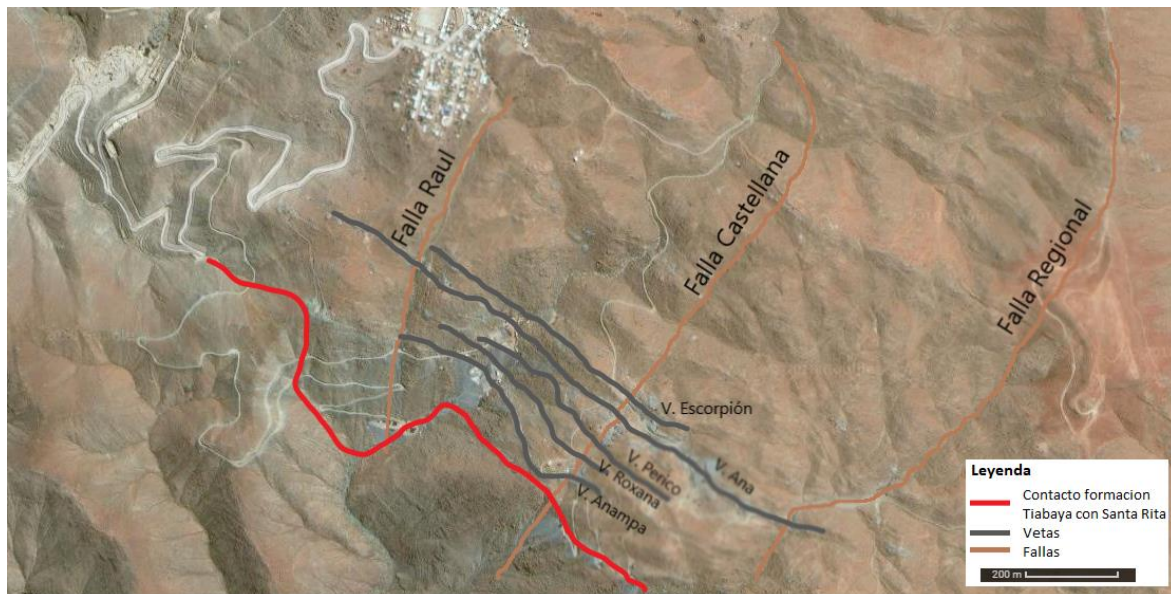
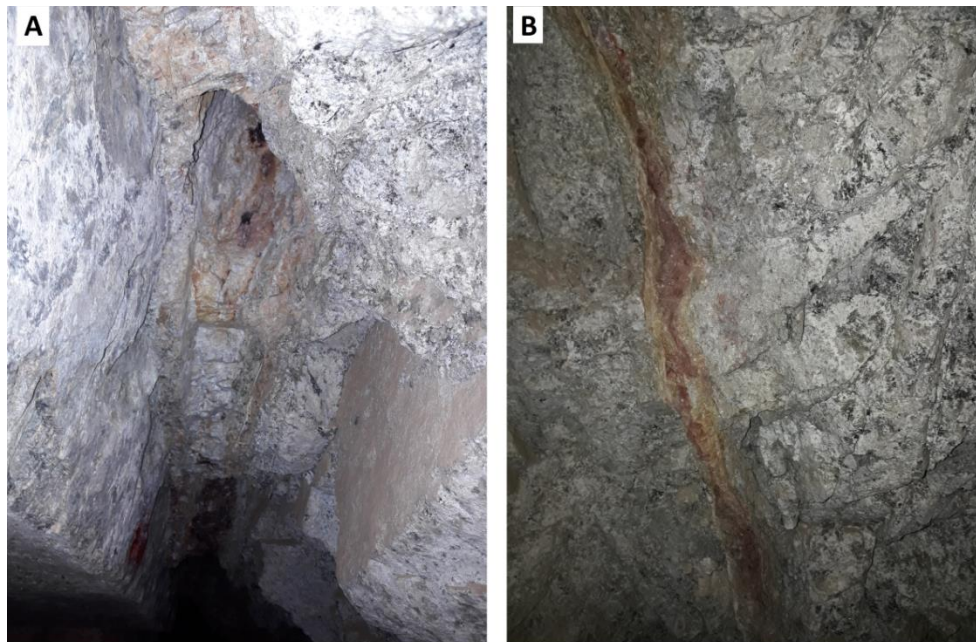


Fig. 5 – Mapa de las vetas que forman la mina de FIDAMI

Las mineralizaciones explotadas en la mina de FIDAMI vienen dadas en forma de vetas con una potencia de mineral inferior a 1 metro. Estas vetas son de color rojizo debido a la abundancia de óxidos de hierro (Fig.6, 7), están mayoritariamente constituidas por cuarzo y son paralelas entre sí. Su emplazamiento se realiza como relleno de fracturas.



**Fig. 6 – Veta Ana en interior de la mina donde A) ya ha sido extraído la mayoría del mineral y B) aún queda mineral por extraer**

La explotación de las vetas puede darse en galerías estrechas donde la mineralización es de potencia pequeña o en zonas donde la potencia llega hasta la superficie. Todas las galerías actuales de la mina han sido hechas a partir de la extracción del mineral, por lo que suelen ser inclinadas y con dirección y buzamiento similar o igual a las vetas.



**Fig. 7 – Estructura de las galerías donde A) veta estrecha y con poca potencia de mineral y B) veta con gran potencia y con afloramiento en superficie**

## 6. Metodología

### 6.1 Muestreo

Para poder determinar la mineralogía de la zona y del material que la empresa minera FIDAMI extrae, se realizó un muestreo de las vetas, incluyendo la roca envolvente de esta, del interior de las diversas vetas, de su superficie, de la planta de procesamiento y de los residuos.

También se tomaron medidas de los buzamientos de las vetas principales para poder determinar su dirección y las familias de discontinuidades en el interior de la veta Ana para determinar la estabilidad de las galerías de la mina.

### 6.2. Composición química

Las muestras han sido trituradas y cuarteadas los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de Minas, en la Universidad Católica, en Lima. 30 g se han separado para la realización de análisis químico. Para determinar el contenido de oro las muestras se enviaron al laboratorio ALS, donde se usaron los métodos AU-AA25 (ensayo de fuego fusión con recuperación AA) y AU-GRA21 (ensayo de fuego fusión con recuperación gravimétrica). El ensayo de fuego fusión consiste en determinar el contenido de oro mediante la mezcla de la muestra con flujos de ensayo de fuego, como son el bórax o sílice, y se calienta hasta su fusión que después se coloca en un molde que absorbe el plomo para recupera el Ag y el Au. La recuperación AA consiste en determinar la concentración del oro a partir de la absorción atómica de un haz de luz de cada elemento y la recuperación gravimétrica consiste la diferencia de peso entre la mezcla fusionada y la mezcla con la separación del Ag a través de ácido nítrico. Cada uno de los métodos va en función del contenido esperado en oro; ya que el límite máximo de método AU-AA25 es de 100 ppm, en cambio el AU-GRA21 llega hasta 1000 ppm.

### 6.3. Confección de probetas para observación al microscopio

Para la preparación de las probetas se emplearon unos equipos de protección individual (EPI's) y los equipos de preparación de las probetas. Las protecciones de seguridad (EPI's) tenemos: bata, gafas protectoras, guantes y mascarilla.

Para la preparación de las probetas es necesario el uso de sierra, horno, congelador y pulidora y como herramientas de laboratorio se ha empleado el uso de un vaso de precipitados, moldes para probetas, espátula, agitador de vidrio resina epoxica, catalizador, lubricante de silicona y lubricante azul para la pulidora.

El procedimiento para la preparación de las probetas es el siguiente:

1. En primer lugar, se busca la parte que nos interesa de la roca y se procede a cortar con la sierra siempre teniendo en cuenta de no dañar la parte que queremos mirar por el microscopio después. En algunos casos, las rocas eran de tamaño grande, por lo que previamente se realizaba un corte por la mitad en busca de mineralizaciones interesantes ya que, si la parte en la que estamos interesados tiene un corte más limpio, se podrá observar mejor posteriormente. La muestra debe de ser menor a 2,5 cm de altura, ya que es el tamaño de los moldes de las probetas.
2. Cuando ya están todas las muestras cortadas, se prosigue con la preparación de la mezcla de la resina epoxica. Por cada dos partes de resina, se precisa una parte de catalizador para que la resina endurezca más rápidamente. La mezcla se debe remover con un agitador de vidrio y dejar reposar unos minutos.
3. Se rocía con lubricante de silicona todo el interior de los moldes de las probetas y se coloca la muestra de roca dentro y bien colocada, con la cara que interesa tocando la base del molde. Una vez colocada la muestra dentro del molde, se rellena de la mezcla de resina hasta que toda la muestra quede cubierta y se deja endurecer 24 horas a temperatura ambiente.
4. Una vez que las muestras estén duras, se ponen en el congelador cerca de 3 horas para que acaben de secar. Si después de sacar las muestras del congelador aún no están del todo duras, se colocan en el horno por 48 horas a temperatura de 60°C para que acaben de endurecer.
5. Cuando las muestras estén completamente duras, se retiran del molde y se vuelven a cortar. Se recorta la base de las muestras con un grosor de 7cm, ya que si no podrían dificultar las pruebas analíticas.
6. Cuando tenemos todas las muestras cortadas y sin moldes, las pulimos para que tengan un acabado liso. Primero, se pulen las muestras con la pulidora que deberá de tener un goteo de lubricante azul de 1 cada 10 segundos y un papel de lija de grosor 250 mm de base para quitar la capa de resina de encima de la cara que miraremos más tarde por el microscopio. En principio, las muestras estarán 30 min en la pulidora pero si pasados estos minutos aún mantiene resina, se puede aumentar en 15 min hasta que este pulido. Cuando ya no tiene capa de resina, se hace un pulido a mano con carborundos. En el laboratorio encontramos 5 placas de cristal donde se colocan los 5 carborundos respectivamente con ayuda de una espátula y añadiendo un poco de agua destilada para crear una pasta. Se empieza por la primera placa con un



tamaño de grano del carbonado de 320  $\mu\text{m}$  y durante 5 minutos damos círculos sobre la pasta con la cara de la probeta que nos interesa. Después se limpia la muestra con un cepillo y pasta de dientes para quitar los restos de pasta que puedan haber quedado y se sigue con el mismo proceso para los siguientes tamaños que son de 600  $\mu\text{m}$ , 800  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$  y 1200  $\mu\text{m}$ . El pulido de las muestras con los tamaños de carborundo de 1000  $\mu\text{m}$  y 1200  $\mu\text{m}$  deberá de ser de 10 minutos en vez de 5 minutos.

7. Para el pulido final, prepararemos la pulidora con el disco de 9  $\mu\text{m}$  y se pondrá una gota de pasta de diamantes de 9  $\mu\text{m}$  durante 45 minutos a 200rpm. Al acabar este proceso, se limpiará la probeta de nuevo con el cepillo y la pasta de dientes y se repite el proceso con una placa de 3  $\mu\text{m}$  y la pasta de diamante de 3  $\mu\text{m}$  45 minutos y con otra placa de 1  $\mu\text{m}$  y pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  otros 45 minutos. Finalmente, limpiamos las probetas nuevamente con el cepillo y la pasta de dientes.

#### 6.4 Composición mineralógica

Para determinar la mineralogía de las muestras se prepararon probetas de 10 muestras de roca y se observaron las probetas con el microscopio petrográfico para determinar los minerales presentes en los materiales presentes en las minas, los residuos y en los materiales procesados en la planta de concentración. Esta observación se realizó con el microscopio petrográfico de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM).

Para observar las características de los minerales de oro en detalle y sus asociaciones, así como la composición cualitativa de los mismos, las probetas se analizaron también a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) con análisis por espectroscopia de energías dispersivas de rayos X (EDS). Esta técnica se basa en imágenes que proceden del resultado de las interacciones entre electrones incidentes y los electrones de la muestra original. Esta interacción emite rayos X que se registran en un espectro con picos característicos para cada elemento de la tabla periódica. Este análisis se ha realizado en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM) con un microscopio electrónico Hitachi TM-1000 tabletop.

## 6.5 Procesamiento

### 6.5.1 Granulometría

Se ha tomado las medidas granulométricas del residuo de la mina de FIDAMI y la mina de San Luis para determinar el rendimiento del procesado de cada una. Para ello se ha utilizado un analizador de granulometría por difracción laser *Beckman Coulter LS Particle Size Analyzer* del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Barcelona.

### 6.5.2. Ensayo de pH en pasta

Se ha realizado el ensayo de pH en pasta en el relave de la minera FIDAMI y en el relave de la mina de San Luis, ya que la recuperación de oro en la mina de San Luis es mucho más elevada que en FIDAMI. Este ensayo trata de determinar el nivel de pH en la solución o residuo del procesado ya que cuanto más elevado sea el pH (más alcalino), más poder de absorción tiene. En FIDAMI, el procesado se hace con una solución de agua y cianuro mientras que en San Luis se utiliza también cemento. Este ensayo no costa de normativa aplicable y por lo tanto se siguió el siguiente procedimiento:

Material utilizado: Agua destilada, vasos de precipitados, pHímetro, agitador magnético, barra de agitación

Procedimiento:

1. En primer lugar, se hace una solución de cada uno de los relaves en relación de 20 gramos de relave por cada 20 ml de agua destilada.
2. Se coloca la barra de agitación dentro del vaso de precipitados y se coloca en el agitador magnético a temperatura alta durante 5 minutos.
3. Después se deja reposar durante 10 minutos para que sedimente y posteriormente se mide el pH de la solución.
4. Se repite el mismo procedimiento con la otra solución y se comparan los resultados. En el caso de que la solución fuera muy higroscópica, se le puede doblar la cantidad de agua destilada de la solución siempre y cuando se añada también a la otra aun que ésta de buen resultado.

## 6.6 Estudio geotécnico

### 6.6.1 Resistencia a la compresión simple

Se realizó ensayos de resistencia a la compresión simple según la normativa UNE-EN 1926:2007 *Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial*. Este ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión de una muestra de sondeo normalizada, a partir de la aplicación de una carga uniaxial perpendicular a las caras horizontales de la muestra. En este caso, se realizó a partir de sondeos cedidos por la mina y se realizaron con la prensa del laboratorio de Optimore, de la EPSEM, y la prensa INSTRON (200 Tn) del laboratorio de mecánica de suelos y rocas de la ETSCCPB – Campus Nord, que nos permite obtener la curva de rotura de las muestras.

Con los resultados que nos da se calcula la carga máxima que puede soportar por unidad de superficie de la roca a partir de la fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ MPa}$$

### 6.6.2 Ensayo de carga puntual

Se realizaron ensayos de carga puntual según la normativa UNE 22950-5 *Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 5: resistencia a carga puntual*. Este ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión a partir de muestras del macizo rocoso a determinar a través de someterle presión por un punto en una cara de la muestra. En este caso los ensayos se realizaron en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Con los resultados de carga puntual se calcula el índice de carga puntual, que se calcula a partir de la carga de falla por el diámetro de la muestra:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \text{ MPa}$$

P = carga de falla, N

De = diámetro del núcleo equivalente = D para muestras diametrales, m, y es dada por:

De2 = D2 para muestra diametrales, mm<sup>2</sup>, o

De2 = 4A/π para muestras irregulares, axiales o bloques, mm<sup>2</sup>;

### **6.6.3 Estudio de discontinuidades**

Se ha realizado un estudio de las discontinuidades medidas en la galería de la veta Ana (Fig. 5) mediante la proyección estereográfica de las fracturas con el programa DIPS de Rocscience©. A partir de los resultados del programa, se determinará la estabilidad de la galería y las direcciones más favorable y desfavorables.



## 7. Proceso productivo

### 7.1 Explotación de mineral

La mina es explotada por la cooperativa FIDAMI, que extrae el oro que se encuentra en un yacimiento formado por varias vetas de cuarzo de hasta 40 cm de anchura paralelas en dirección 290-310 NW y con una inclinación entre 58° y 78°.

La actividad principal se realiza en una mina subterránea que explota la veta Santa Ana, con las siguientes características:

- Dimensiones: la mina tiene 250 metros de largo, alrededor de 1.5 m de ancho. El trazado de la mina va siguiendo la veta, de manera que es subterránea los primeros metros de la entrada, pero luego las excavaciones han llegado a alcanzar la superficie.
- Sostenimiento: el sostenimiento de las galerías en general se realiza con el propio macizo rocoso en las galerías con dimensiones inferiores a 10m de dimensión (ya sea diámetro, anchura o altura). Si la galería sobrepasa de estas dimensiones, se utilizan puntales de 4" y 6" para asegurar el sostenimiento de la galería.
- Perforación: la perforación se realiza con máquinas de perforación eléctricas y con un ancho de minado de hasta 0,45m para que no se contamine el mineral roto.
- Voladura: el explosivo utilizado para la voladura es dinamita Famesa al 65% y los arranques de la voladura son en tipo V.
- Transporte: el material ya volado se transporta con carretillas dentro de la mina y a través de skips para sacarlo al exterior. El material en superficie se lleva a la planta de procesamiento a través de camionetas.

### 7.2 Procesamiento del mineral

Los métodos de procesamiento son un conjunto de acciones con la finalidad de obtener una materia prima mineral con valor económico. El proceso general consta por una disminución de tamaño de los granos para después poder continuar con la separación del mineral deseado del resto.

En este caso los métodos empleados principalmente constan de una trituración a través de un molino de bolas, una posterior cianuración y concluye con la separación del oro mediante el carbón activado (elución). El proceso de elución se produce en una

empresa exterior ya que las instalaciones de la minera FIDAMI no consta de la maquinaria adecuada para llevarla a cabo.

### 7.2.1 Reducción de tamaño

La trituración en estas minas se efectúa mediante machacadoras de mandíbulas, dando lugar a fragmentos generalmente de alrededor de 2 mm. Seguidamente el material pasa a un molino de bolas para su reducción desde tamaños alrededor de 2 mm hasta muy finos, con el objetivo de liberar al máximo los minerales de oro. Éste molino dentro contiene una serie de bolas de acero de tamaño variable que suelen ocupar un 30% o 40% del espacio interior y con el movimiento rotacional del molino, trituran el material introducido.

Para minimizar las pérdidas de mineral, la molienda se produce junto a la solución de agua y cianuro de tal manera que el polvo creado en una molienda queda mezclado con la solución y no produce humos cargados de partículas. Desde un punto de vista ambiental, éste método también resulta mejor ya que se reduce la emisión de polvo a la atmósfera.

En las instalaciones de la planta de FIDAMI cuentan con tres molinos de bolas (Fig. 8), de unos 120 cm de diámetro. En esta Figura también se observa la estructura construida para mantener los molinos de bolas siempre en posición y para minimizar la pérdida de material cuando ésta lo descarga. Dentro del molino, el material se mezcla con una solución de agua y cianuro para facilitar la cianuración posterior.



Fig. 8 - Dos de los tres molinos de bolas de la planta de procesamiento de FIDAMI.

### 7.2.2 Cianuración y lixiviación

La cianuración del oro es un proceso metalúrgico que busca la extracción del oro mediante la búsqueda de oro disuelto en agua con cianuro mediante un proceso llamado lixiviación. El cianuro está compuesto de carbono y nitrógeno y se puede encontrar natural en el medio.

La lixiviación es un proceso por el cual se extrae un material sólido de una solución acuosa o disolvente líquido. El soluble produce la separación de los componentes originales del sólido. La lixiviación en FIDAMI se da en unas balsas con membrana impermeable (Fig. 9) donde se deposita el material mezclado con el agua y el cianuro y la membrana impermeable, a través de una canalización, recoge la solución producida del cianuro con el oro lixiviado.



**Fig. 9 - Balsa de depósitos de lixiviación donde se observa la membrana impermeable**

Una vez transcurridas 24-48h la membrana impermeable ha canalizado la lixiviación del oro y es llevado hasta unos tanques. En ellos se añade carbón activado previamente lavado con agua y se deja reposar por una semana para que la reacción del carbón con la solución del oro y el cianuro suceda. Transcurrido este tiempo el carbón, por su alta porosidad, atrapa las partículas del oro y lo disuelve del cianuro.

En la planta de procesamiento de San Luis, el proceso es similar ya que en la solución de agua y cianuro también se le añade cemento para que la mezcla sea más ácida.

## 8. Resultados

### 8.1. Rocas encajantes

La zona donde se ubican las minas de San Luís Alta y FIDAMI está formada por granodioritas y dioritas. Alrededor de las vetas se pueden encontrar estas rocas alteradas. Muchas de estas alteraciones son de seritización (Fig. 10), y en este caso la forman plagioclasas con biotita. En el caso de la granodiorita, la presencia de cuarzo es más alta que en la diorita y en ambos minerales está presente la hornblenda, que presenta un alineamiento de los granos con los granos de la biotita y forman una foliación en la roca.

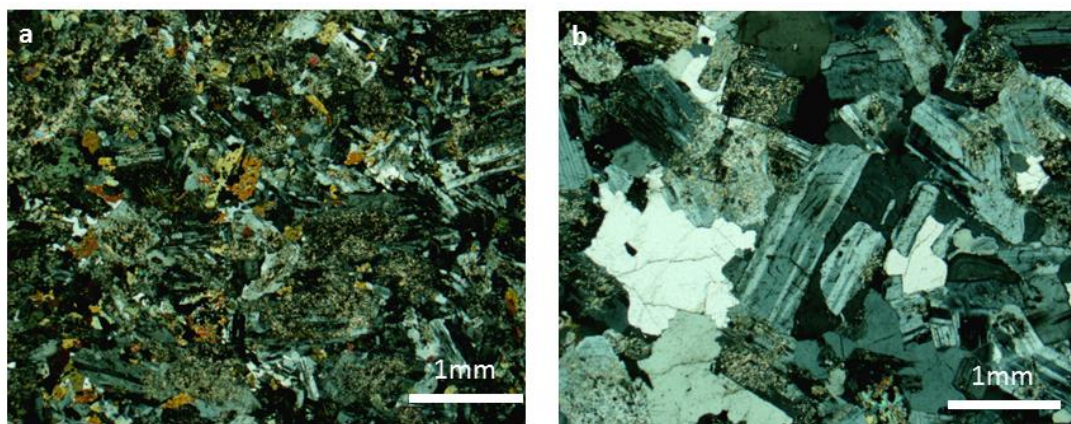


Fig. 10 - Imágenes al microscopio de las rocas de la formación Tiabaya presentes en el área de estudio. (a) Diorita, con abundante seritización. (b) granodiorita.

### 8.2. Composición mineralógica

Los minerales más abundantes en las vetas explotadas son el cuarzo y hematites, encontrándose también algo de sulfuros en zonas muy localizadas. Los sulfuros identificados fueron pirita, calcopirita, calcosita y galena. También existen minerales formados por la alteración de los minerales de cobre, como la covellita, bornita, azurita y malaquita. También, pero en menor abundancia, encontramos presencia de scheelita.

En FIDAMI el oro se observa abundantemente y se encuentra normalmente encapsulado en el cuarzo y en menor proporción en los óxidos de hierro (Fig. 11) y muy raramente en sulfuros. En el caso de San Luis el oro también se encuentra encapsulado en los óxidos de hierro y en el cuarzo pero es relativamente abundante en la pirita (Fig. 12).



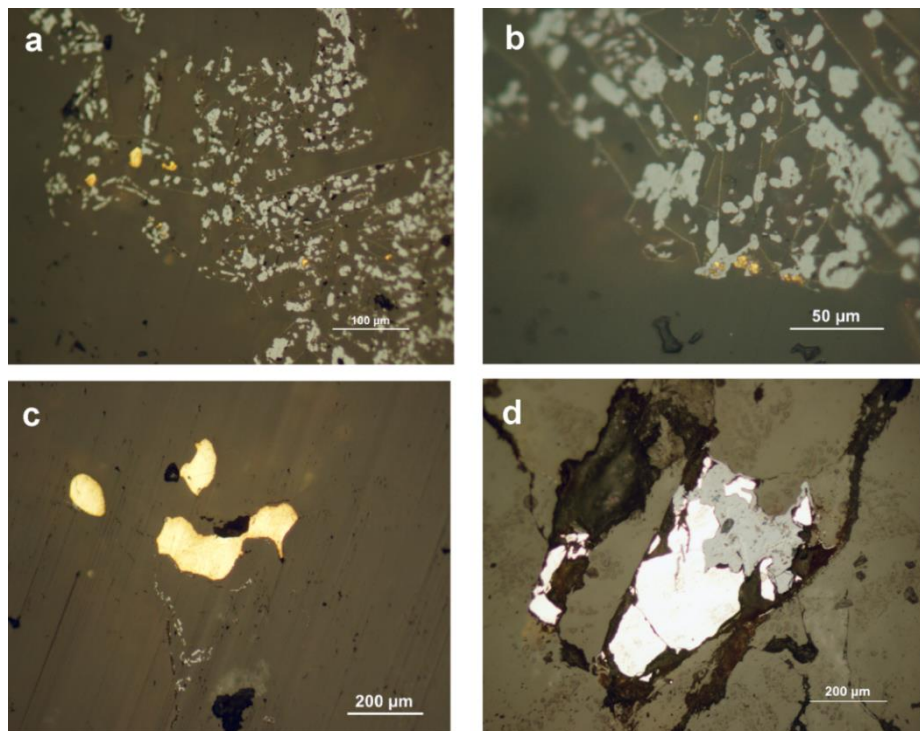


Fig. 11 – Imágenes del oro de la mina de FIDAMI y sus asociaciones minerales. A, oro (amarillo) junto a óxidos de Fe (gris); b, oro encapsulado en óxidos de Fe; c, oro nativo encapsulado en cuarzo; d, pirita que está siendo reemplazada por óxidos de Fe.

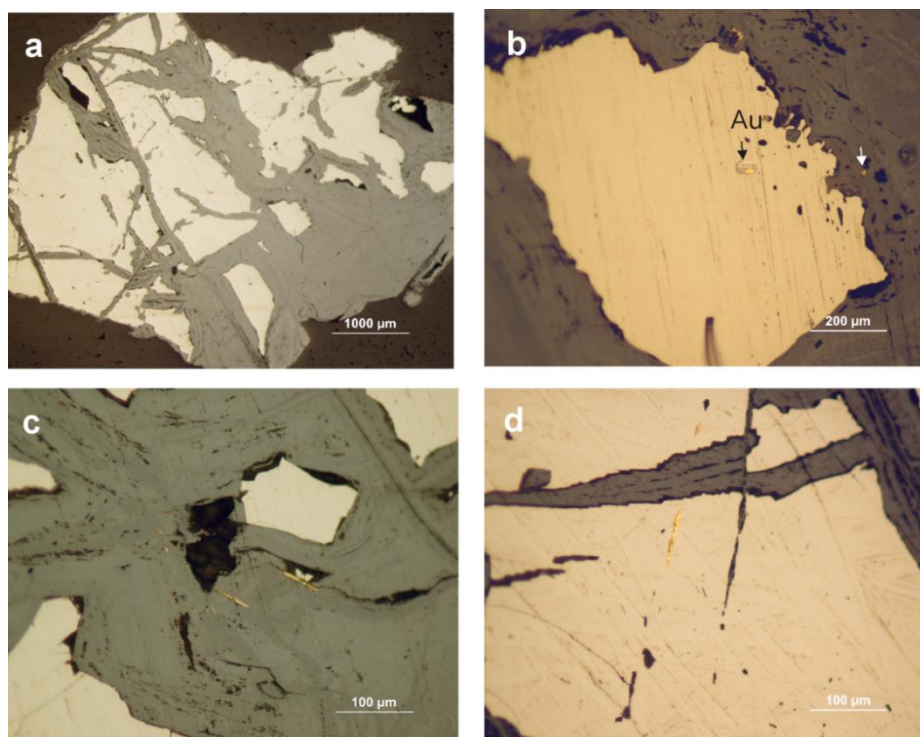
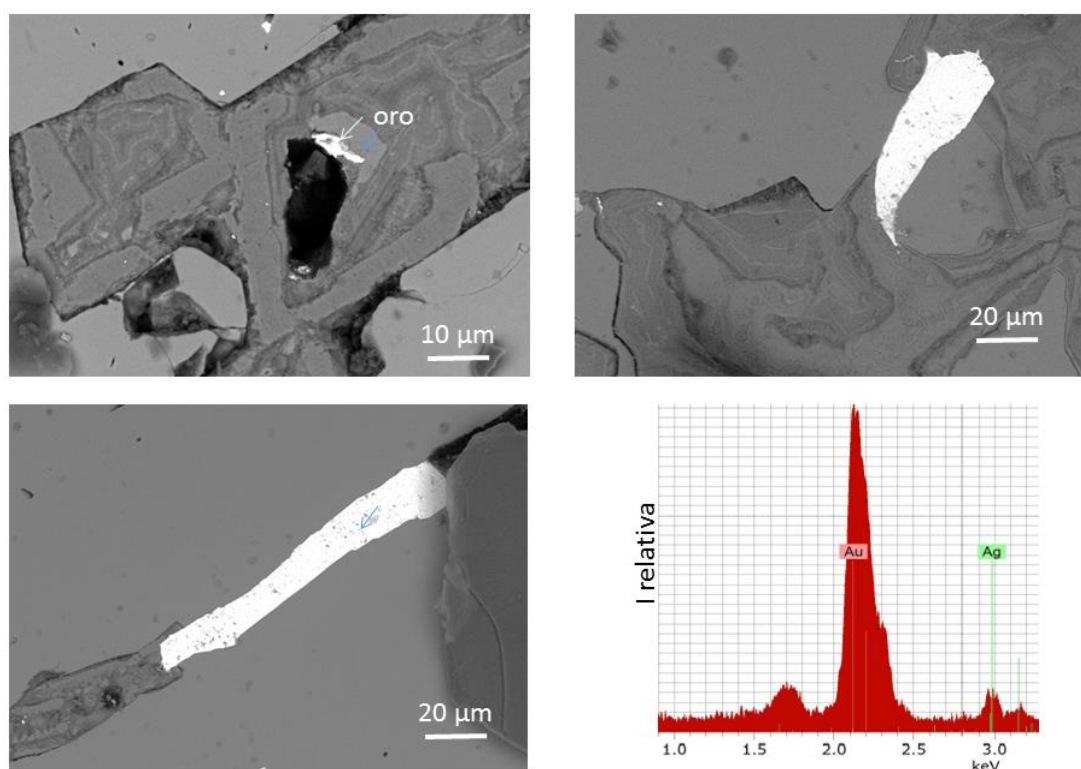


Fig. 12 – Imágenes del oro de la mina de San Luis Alta y sus asociaciones minerales. A, Pirita (amarillo claro) que está siendo reemplazada por óxidos de hierro (gris); b, detalle de la imagen A donde se ve el oro (amarillo) encapsulado en la pirita; c, oro (líneas amarillas) en óxido de hierro; d, oro (línea amarilla) encapsulado en pirita.

Para determinar las características composicionales del oro y ver más detalladamente su asociación con otros minerales se utilizó en microscopio electrónico. En el caso de la mineralización de FIDAMI el oro se ha encontrado principalmente en estado nativo. En este caso su pureza es bastante elevada, siendo casi imperceptible el contenido en plata (Fig. 13) encontrar libre o asociado a algún mineral como por ejemplo la pirita y en algunos casos el tamaño de las partículas es suficientemente grande para ser vista sin necesidad de microscopio.



**Fig. 13 – Imágenes del oro nativo en muestras de la mina de FIDAMI. En la parte inferior derecha se observa el espectro generado por el EDS en el que se aprecia la composición del oro de la imagen inferior izquierda, habiendo, además del oro, únicamente un pequeño pico de la plata.**

En ocasiones se ha visto que el oro está en la forma de telururo. Estos se encuentran en mayor medida en las muestras que también contienen sulfuros. Los telururos son mucho más abundantes en San Luís que en FIDAMI. En algunos casos estos telururos son únicamente de oro pero también abundan los que contienen Ag o Ag y Au incluso se ha observado algún o con Pb y Bi. En algunos casos la composición de los telururos es uniforme en todo el grano mineral (Fig. 14) o varía a lo largo de un mismo grano (Fig.15).

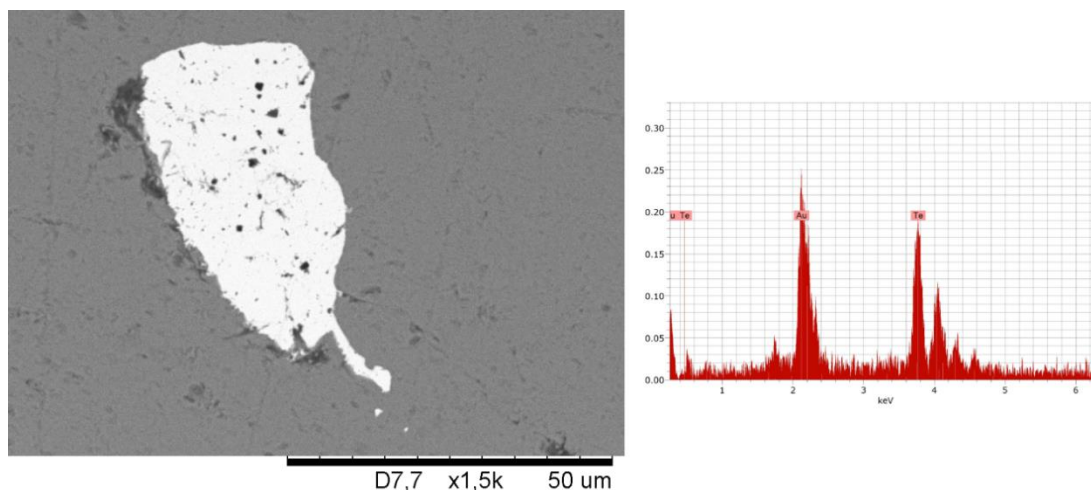


Fig. 14 – Imagen del SEM donde se observa una mineralización de oro con telururos

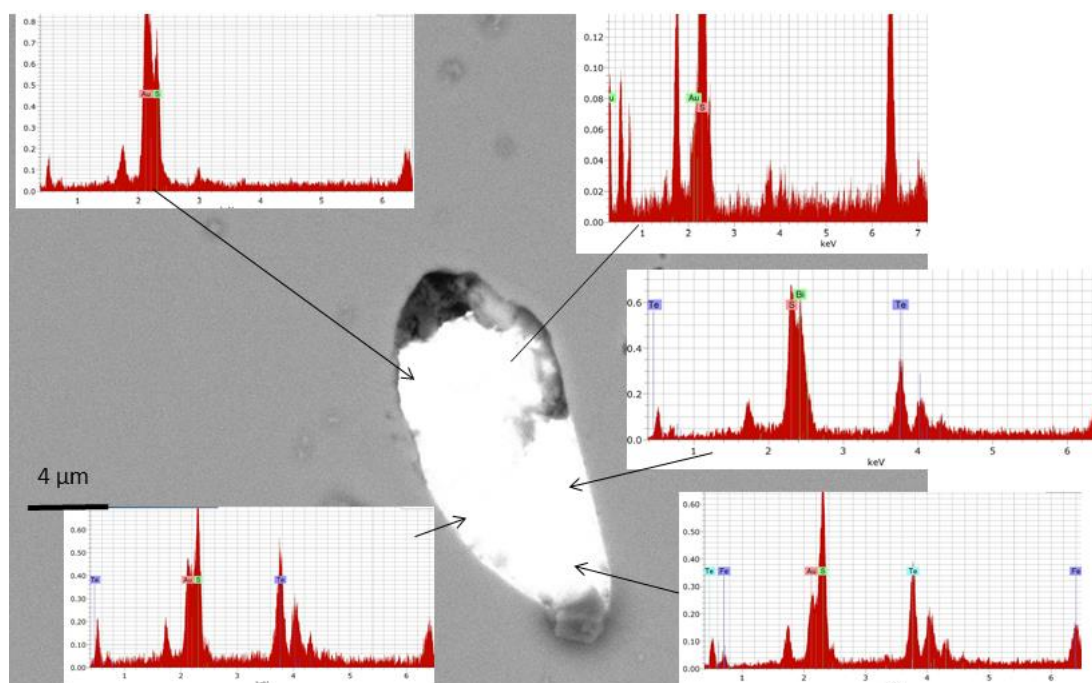


Fig. 15 – Imagen del SEM en una mineralización de oro con telururos con diferentes porcentajes de los dos elementos en diferentes partes, como se aprecia en los espectros EDS incluidos.

### 8.3. Leyes de las mineralizaciones y materiales tratados

Con el material muestreado en FIDAMI se ha realizado una valoración del contenido en oro mediante análisis químico de aquellas muestras de las que se podía disponer de una cantidad de material considerable.

Los resultados analíticos (Tabla 1) muestran que las tres vetas analizadas de FIDAMI tienen un contenido en oro considerable. En dos de ellas, también se ha analizado su contenido en muestras de sus afloramientos en superficie donde se han obtenidos

valores mucho menores. Esto podría indicar que la ley va aumentando con la profundidad. No obstante esta afirmación requeriría análisis de más lugares. Aun con los más bajos valores superficiales, éstos resultan de interés desde un punto de vista económico.

También muestran que en las cuatro vetas analizadas de San Luis predomina la galería principal con una alta cantidad de oro y va disminuyendo la cantidad a otras vetas hasta tal punto que, en la veta Clider, la cantidad de oro que hay es mucho menor pese a que la muestra analizada sea de interior.

**Tabla 1 - Contenido en oro de diferentes vetas, material de la planta de tratamiento y residuos.**

Lugar	Material	Muestra	Oro (g/t)
FIDAMI	Veta Ana	FDM-27	40,20
FIDAMI	Veta Ana Superficie	FDM-07	7,95
FIDAMI	Veta Escorpión	FDM-15	63,50
FIDAMI	Veta Escorpión Superficie	FDM-22	1,19
FIDAMI	Veta Anampa T-D	FDM-03	23,10
San Luis	Veta Clider	SL-1	1,04
San Luis	-	SL-2	22,6
San Luis	-	SL-2b	>30
San Luis	Galería principal	SL-11	59,8

## 8.4 Estudio del procesamiento

### 8.4.1 Composición química

Se ha analizado una muestra de relave en la que determinaron contenidos en oro de 15 g/t (ppm). En FIDAMI el procesamiento de mineral se produce a través de cianuración y esto indica que la cantidad de oro que se pierde en el tratamiento es muy elevada por lo que se debería revisar el diseño y funcionamiento de la planta de beneficio ya que el grado de recuperación es muy bajo y las pérdidas son elevadas.

También se ha analizado el relave actual de San Luis y se ha comparado con resultados de estudios anteriores. Se observa que se ha pasado de una recuperación media de 42,2 g/t a un 1,25 g/t (Tabla 2). En San Luis antiguo la recuperación de oro se hacía con amalgamación de mercurio, y este método daba una cantidad de recuperación muy baja de oro ya que si el mercurio no envuelve por completo el oro es incapaz de liberarlo, en cambio, actualmente la liberación del oro se hace mediante cianuro que es mucho más eficaz y además se le añade cemento para mejorar esta recuperación.



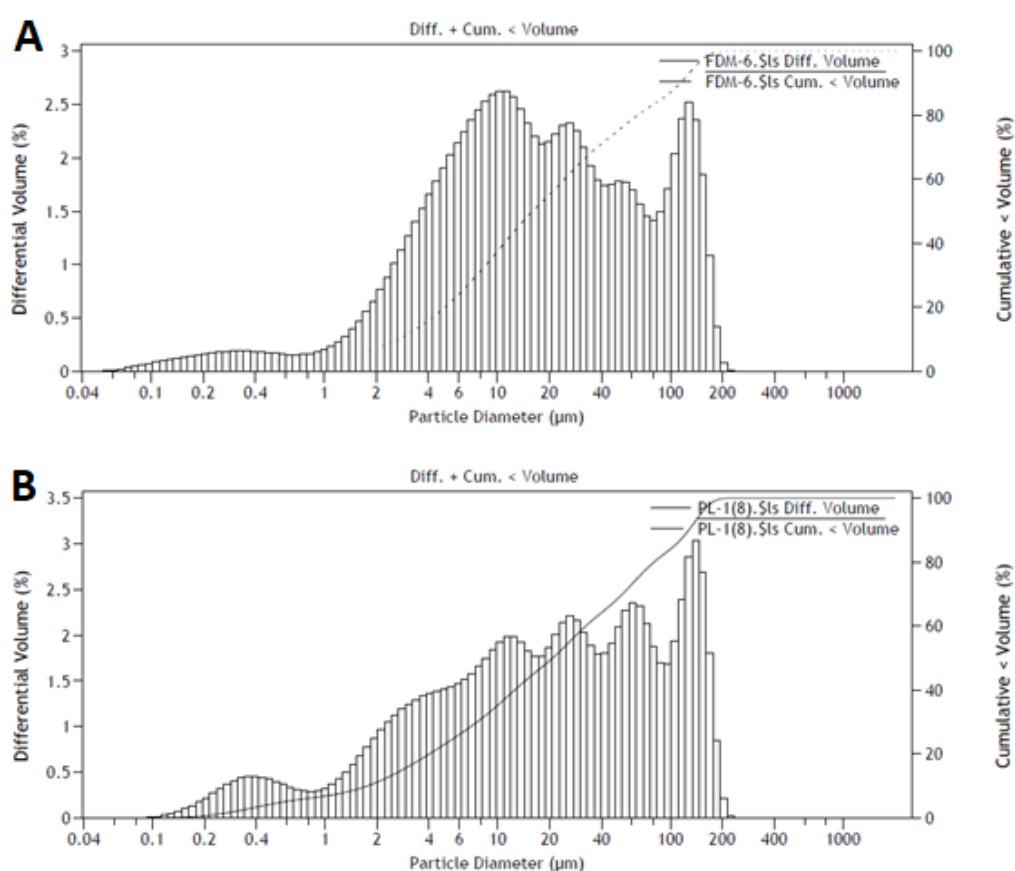
**Tabla 2 - Contenido en oro de diferentes vetas, material de la planta de tratamiento y residuos.**

Lugar	Material	Muestra	Oro (g/t)
FIDAMI	Relave	RLV	15,9
San Luis	Relave	PLO4	1,25
San Luis	Relave antiguo	L-2	34,5
San Luis	Relave antiguo	L-6	52,0
San Luis	Relave antiguo	L-7	40,1

Si comparamos los resultados, vemos que la recuperación a través de cianuro (FIDAMI) es superior a la recuperación por amalgamación con mercurio (San Luis, relave antiguo) pero que, si además se le añade cemento a la solución con cianuro (San Luis, relave actual) la recuperación de oro se acerca a su total.

#### 8.4.2 Granulometría de las pulpas

Los resultados de la granulometría realizada del relave de FIDAMI y San Luis determinan el tamaño de partícula que produce cada molienda. A partir de la gráfica (Fig. 16) que clasifica las partículas según su tamaño se extrae el diámetro de abertura del tamiz para el 10, el 50 y el 90% de la cantidad de cada muestra (Tabla. 3).


**Fig. 16 – Granulometría del material sometido a cianuración, A) FIDAMI y B) San Luis Alta.**

**Tabla 3 – Distribución de tamaños de partícula para el 10, 50 y 90 % de las muestras cianuradas.**

Material	D10 $\mu\text{m}$	D50 $\mu\text{m}$	D90 $\mu\text{m}$
FIDAMI	2,69	15,99	114,10
San Luis	1,76	20,83	127,90

El número de finos al principio es más alto en FIDAMI pero luego las partículas son más pequeñas en la molienda de San Luis, lo que indica que la variación de diámetros de las partículas es más alta en FIDAMI y que posiblemente la molienda se produzca mayormente en una parte del material que en otro. En cambio en San Luis, la molienda está más igualada para tamaños mayores que para tamaños menores.

#### 8.4.3 Acidez de las soluciones cianuradas

Las pruebas del pH en pasta indican los siguientes resultados:

- Material de FIDAMI: 7,75
- Material de San Luís: 10,73

A partir de estos resultados se deduce que en San Luís se obtenga una recuperación de oro más alta gracias a que su pH es más alto que en FIDAMI y, por lo tanto, se puede afirmar que es cierto que cuanto más alto sea el pH (o más alcalino), mayor será la recuperación de oro.

Se propone incrementar este pH a través de la incorporación de un soluble para que sea más alcalina la solución de recuperación de mineral como puede ser la cal o el cemento ya que son dos materiales asequibles, eficaces y que pueden dar buenos resultados en su incrementación.

#### 8.4.4 Nueva propuesta de procesamiento

Como ya se ha comprobado, la recuperación del oro en FIDAMI es muy inferior que en San Luis y esto se debe a los métodos de recuperación de mineral que se emplea en cada uno. En el caso de FIDAMI, el oro se encuentra encapsulado por cuarzo, por lo que el cianuro no es capaz de llegar hasta él y se pierde. Para incrementar esta recuperación, se propone la trituración del mineral hasta que el tamaño de estos sea fino, por lo que el oro estaría libre y se podía recuperar. Este método formaría mucho polvo y la necesidad de mover grandes cantidades de material, por lo que no es el

más adecuado. Otro método que se propone es el uso de disolventes de los minerales envolventes del oro (Tabla 4).

**Tabla 4 - Etapas de lixiviación de pretratamiento selectivo y los minerales atacados (Lorenzen, 1995)**

Reactivo	Minerales que pueden ser destruidos
NaCN lavado	Precipitado de oro
NaCN	Oro libre
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Yeso y arseniato
HCl	Calcita, dolomita, galena, pirrotita, hoetita, carbonato de calcio
HCl/SnCl <sub>2</sub>	Hematita, calcina y ferrito
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cu-Zn sulfuros, pirita lábil, uraninita, esfalerita
FeCl <sub>3</sub>	Esfalerita, galena, sulfuros lábiles, tetraedrita, concentrados de sulfuro
HNO <sub>3</sub>	Pirita, marcasita, arsenopirita
Lavado con ácido oxálico	Revestimiento de óxido de silicato
HF	Silicato
Elución de acetonitrilo	Oro absorbido en carbón organico, kerógeno, carbón

El problema de uso de disolventes es que, al también tener presencia de telururos, algunos de los disolventes pueden provocar su perdida y el necesario para que esto no pase serían los sulfuros, pero no se han realizado las suficientes pruebas como para determinar qué cantidad de telururos hay presentes. El uso de ácido fluorhídrico sería el más adecuado ya que es capaz de deshacer el cuarzo que mayoritariamente rodea el oro.

También se propone el uso de una mesa de sacudidas para hacer el procesamiento de mineral más selectivo, pero es una inversión económica demasiado alta para una minería a pequeña escala.

### 8.5 Estudio geotécnico

Los macizos rocosos, como medios discontinuos, presentan un comportamiento geomecánico complejo que, de forma simplificada, puede ser estudiado y caracterizado en función de su aptitud para diferentes aplicaciones (Vallejo et al., 2002). Una de las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos más utilizadas es la de RMR (Rock Mas Rating), desarrollada por Bieniawski (1973) con

actualizaciones en 1979 y 1989. La clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Correcciones por la orientación de las discontinuidades.
- Meteorización de la roca.

### 8.5.1 Discontinuidades

Las medidas de las discontinuidades se han tomadas en la galería principal de la veta Ana en FIDAMI. La mayoría corresponden a diaclasas y, en menor proporción a fallas, en las que se ha medido su dirección y buzamiento (Anexo 2). Con el programa DIPS (Rocscience©) se ha realizado su proyección estereográfica de estas familias de discontinuidades de FIDAMI (Fig. 17) y se han agrupado por densidad de concentración.

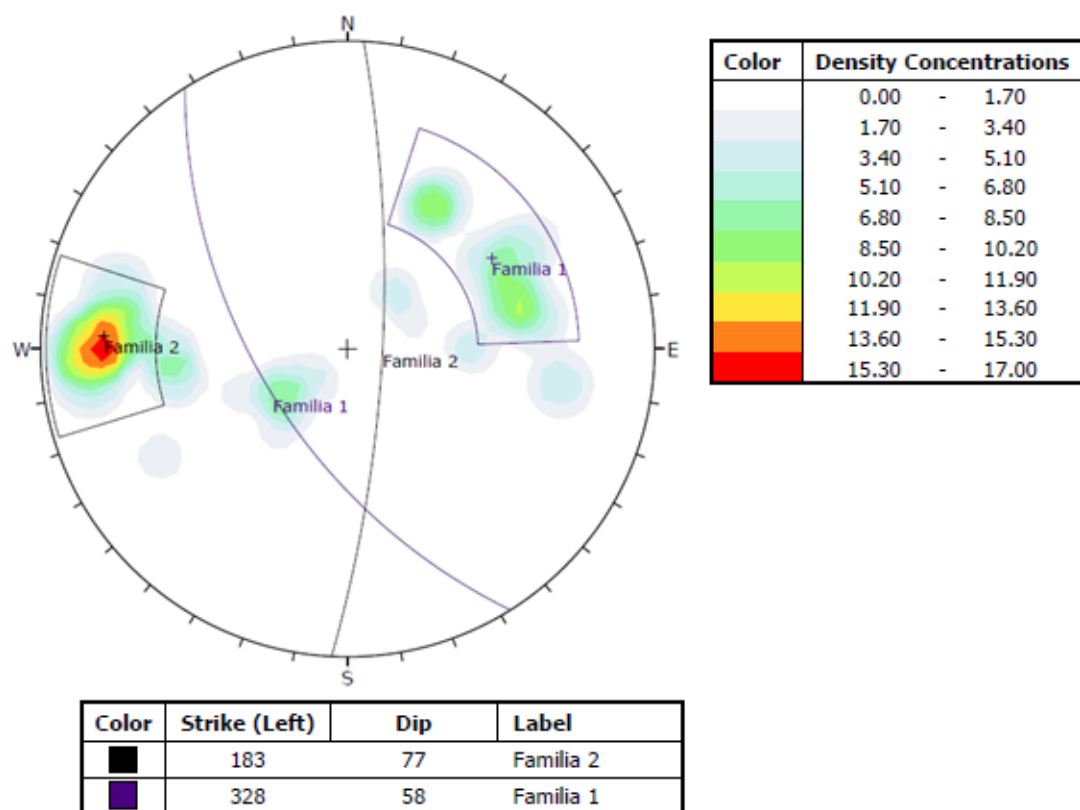


Fig. 17 – Proyección estereográfica de las discontinuidades medidas de FIDAMI.

A partir de las medidas se observa que existen principalmente dos familias de discontinuidades en la galería con la orientación media de cada una de  $328/58^\circ$  NE en la familia 1 y  $3/77^\circ$  NW en la familia 2. La dirección de mina es norte-sur, ya que su trazado va siguiendo la dirección de las vetas. El trazado de la galería en esta dirección resulta bastante estable. De la proyección estereográfica de las discontinuidades se deduce que la dirección este-oeste es la más desfavorable en cuanto a la estabilidad. Por lo tanto, la infraestructura de la mina es segura para los trabajadores.

### 8.5.2 Compresión simple y carga puntual

Los resultados de compresión simple a partir de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 - Resultados compresión simple

Lugar	Muestra	Resistencia compresión (Mpa)
EPSEM	M1	100
EPSEM	M2	49
EPSEM	M3	75
EPSEM	M4	52
EPSEM	M5	33
EPSEM	M10	119
EPSEM	9	$123,5 \pm 23,5$
EPSEM	SL	$63 \pm 29$
Campus Nord	M8	64
Campus Nord	M9	137
Campus Nord	M10	74

Para muestras M8, M9 y M10 se ha grafiado la curva de compresión de la muestra en función de la carga uniaxial aplicada. Se observa que las muestras M8 y M10 tienen una fractura o falla previa ya que la línea es muy recta y se sabe que una roca in fracturas genera curvas de rotura más curvas, como sucede en la muestra M9 (Fig. 18), donde la deformación de la muestra no es proporcional a la carga aplicada. Además de este dato, las dos muestran rompen con una fuerza mucho menor que la muestra que no tiene ningún tipo de fractura, como se esperaba.

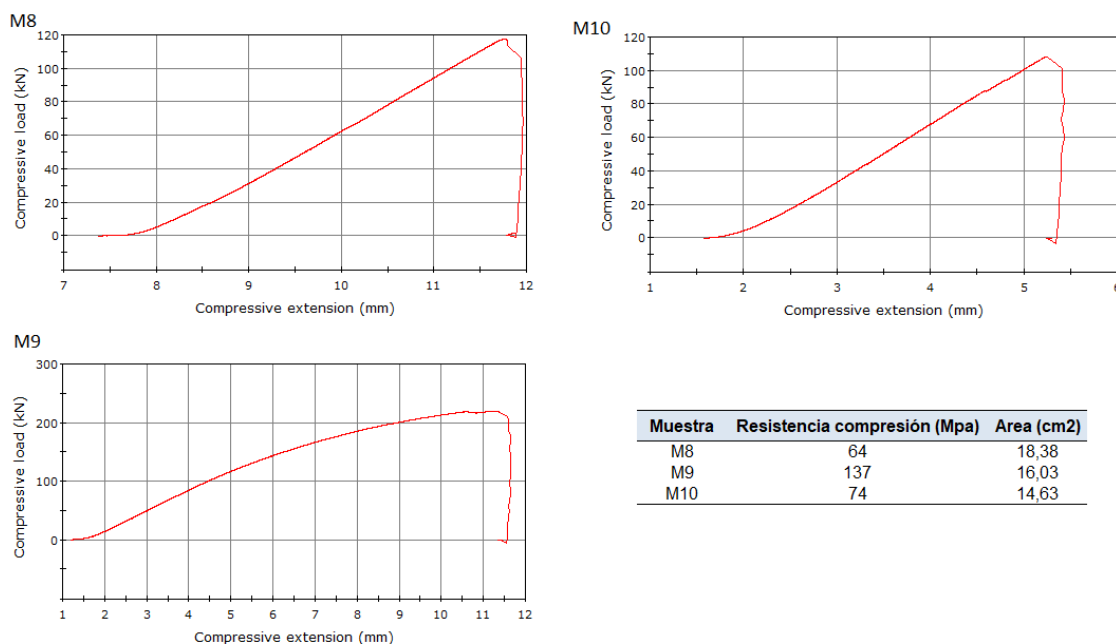


Fig.18 – Gráficas resultantes de la compresión simple de las muestras M8, M9 y M10.

Los resultados de carga puntual a partir de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 – Índice Is a determinado partir del ensayo de carga puntual

Muestra	Is	Resistencia (Mpa)
V.S.	7	160
Ramal	2	34
5.1	10	215
6	10	212

A partir de los resultados clasificamos la roca según la tabla de estimación de terreno de la resistencia compresión uniaxial (Brown, 1980).

Tabla 7 – Estimación de terreno de la resistencia uniaxial de Brown, 1980

Clase	Clasificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Estimación en el terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente resistente	>250	>10	Golpes de martillo geológico solo causan descornamientos superficiales en la roca	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita
R5	Muy resistente	100 – 250	4 – 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba
R4	Resistente	50 – 100	2 – 4	Un trozo de roca requiere más	Calzita, mármol,

				de un golpe con el martillo geológico para fracturarse	filitas, areniscas, esquistos, pizarras
R3	Moderadamente resistente	25 – 50	1 – 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas
R2	Débil	5 – 25	Resultados poco confiables	Un golpe con la punta del martillo deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio
R1	Muy débil	1 – 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descotada con un cortaplumas	Roca muy alterada o muy meteorizada
R0	Extremadamente débil	0,25 – 1		La roca puede ser endentada con la uña del pulgar	Salbanda arcillosa dura

La mayoría de las rocas se clasifican entre muy resistentes o resistentes así que la estructura de la mina se encuentra en una roca que aguantara muy bien la actividad realizada en la mina. Un pequeño porcentaje de las muestras nos da moderadamente resistentes pero esto se debe a que- la roca tenía alguna fractura o falla que ha provocado que se rompa más fácilmente.

## 8.6 Riesgos laborales y ambientales

Durante la visita a la galería de la veta Ana se revisaron las medidas de seguridad que tenía la mina. En el sostenimiento se observó que la entrada estaba formada por rocas muy fracturadas pero al comprobar que la roca es muy competente y que las discontinuidades van contrarias a la dirección de la veta no forman parte de un problema grave de sostenimiento. En el caso de las galerías transversales, las cuales si siguen la dirección más desfavorable, no se han observado bloques libres o de posible caída.

Los accesos de un nivel a otro se realizaban por pequeñas oberturas en el suelo sin señalizar y por donde los trabajadores se deslizan gracias a una cuerda sin ningún tipo de seguridad. Estos agujeros obstaculizan el transporte por la galería y además pone en peligro a los trabajadores con posibles caídas o con posibles roturas de cuerda en el momento que se deslizan por ellos. Se recomienda señalizar la posición de cada uno de ellos y la mejora de los accesos entre las galerías para mejorar la seguridad de los trabajadores. En el caso que ya no esté en uso, se recomienda tapiar la obertura para evitar incidentes.

Otra medida de seguridad que se recomienda es el uso de ventiladores para provocar una circulación de la ventilación. Pese a que la ventilación natural actual de la mina es suficiente, el uso de explosivos tan frecuente sin una espera de tiempo necesaria (solían esperar alrededor de una hora, pero para muchos gases esto no es suficiente) para que los gases formados se evacuen y la continua excavación a niveles cada vez más profundos puede provocar que el oxígeno no sea suficiente en las niveles inferiores. El uso de ventiladores permitirá que el oxígeno llegue a estos niveles tan profundos y que los humos provocados por la explosión sean evacuados con más rapidez y así que los trabajadores no los inhalen.

En la planta de procesamiento, el uso de equipos de protección individual (EPI) no estaban siendo utilizados pese a que era obligatorio: solo uno de los 5 trabajadores que había en el momento de nuestra visita los estaba utilizando. Además las balsas de cianuro no tenían ningún tipo de protección para prevenir caídas al interior, el tanque donde se guarda el cianuro estaba abierto y al aire libre y el recinto daba al borde de una caída donde tampoco aparecía ningún tipo de seguridad para evitar caídas. Los residuos de material eran abocados por este precipicio sin ningún tipo de tratamiento previo y los residuos del lavado de carbón activado se vertía en un agujero en el suelo. Se propone la colocación de vallas o de algún objeto parecido para evitar caídas graves, del uso obligatorio de EPI's para todos los trabajadores y del tratamiento de los residuos de material que contengan cianuro. Este tratamiento puede ser la oxidación del cianuro mediante solubles, como puede ser el cloro, para la reducción de su concentración aun que el coste es casi el mismo que el precio de compra de cianuro o la recuperación del cianuro de los relaves para su reciclaje, que suele ser más económico.



## 9. Conclusiones

En primer lugar, la observación por microscopio, ya sea microscopio petrográfico o microscopio electrónico, nos confirma la presencia de oro en el material extraído de las dos minas, tanto en FIDAMI como en San Luis. Las muestras enviadas al laboratorio nos dicen que el porcentaje de oro presente en ambas minas es muy alto y que, en FIDAMI, también hay presencia de Telururos, que van asociados a metales preciosos como el oro. Actualmente los teluros son muy buscados por sus múltiples aplicaciones pero la presencia de este dificulta la recuperación de los metales a los que va asociados, en este caso, el oro.

En el procesamiento de mineral vemos que la molienda de la mina de FIDAMI es más eficaz que la molienda en San Luis, ya que hay más partículas de finos en la primera que en la segunda pero después el ensayo en pasta indica que en San Luis tiene una recuperación de oro más alta que en FIDAMI. Con tal de mejorar su rendimiento de producción de oro y con la comparación de resultados con una mina ubicada en el mismo emplazamiento pero con mayor beneficio que FIDAMI, se ha determinado que en su procesado, que es bueno en molienda, se puede aumentar la recuperación de oro añadiendo alguna solución alcalina para aumentar los beneficios. Este aumento del pH mejorar la recuperación del oro y también la de Telururos. Además de su bajo rendimiento, también existe el problema de que como el oro está rodeado de cuarzo, el cianuro no puede llegar hasta él y no es posible recuperarlo. Para que se pueda recuperar sería necesaria la aplicación de ácido fluorhídrico para deshacer el cuarzo y poder recuperar el oro, pero esta aplicación también provocaría que se perdieran los Telururos presentes. Por lo tanto y para poder mejorar la recuperación y poder recuperar todos los minerales, una buena opción sería recuperar el oro mediante cianuración y posteriormente recuperar los telururos con la utilización de ácido fluorhídrico. Por otro lado, se propone la utilización de una mesa de sacudidas para crear un proceso selectivo y evitar el movimiento de grandes cantidades de material.

En cuanto a la geotecnia de la mina, los resultados de la compresión simple y carga puntual nos dicen que la roca es resistente, En algunas zonas en FIDAMI, puntualmente la roca estaba alterada pero sería necesaria la toma de más muestras en estas zonas para determinar de qué se trata, en San Luis no había ningún tipo de alteración en la roca. También se ha observado mediante la proyección estereográfica que la mina y sus galerías siguen la dirección más favorable que podrían tener en cuanto a estabilidad y que las dos familias de discontinuidades presentes en la mina no provocan bloques cinemáticamente admisibles. Por lo tanto y en base a estos dos

resultados la mina es estable y su estructura es muy competente para aguantar la actividad minera que se desarrolla. En el caso de que se construyeran galerías transversales de unión de vetas habría que tener en cuenta las familias de discontinuidades que podrían causar problemas y algún desprendimiento.

## 10. Bibliografía

- Aguilar Aguilera, J. C. M. (2008). Caracterización geotécnica y estructural de la rampa de exploración y del túnel de drenaje, mina Chuquicamata.
- Brown E.T. (ed). (1981): Rock characterization, testing and monitoring – ISRM suggested methods, 171-183, Pergamon, Oxford.
- Cobbing, E.J. (1982). The segmented Coastal Batholith of Peru: its relationship to volcanicity and metallogenesis. *Earth-Science Reviews*, 18(3-4), 241-251.
- Ellis S. (2005). Treatment of gold telluride ores. *Developments in mineral processing*, Vol. 15, 973-984.
- Hoek E., Brown E.T. (1980): Underground excavations in rock, p. 527, *Instn. Min. Metall*, London.
- Lorenzen, L., Van Deventer, J. S. J., & Landi, W. M. (1995). Factors affecting the mechanism of the adsorption of arsenic species on activated carbon. *Minerals Engineering*, 8(4-5), 557-569.
- Moore, N.D., Agar, R.A. (1985) Variations along a batholith: the Arequipa segment of the Coastal Batholith of Peru. in *Magmatism at a Plate Edge. The Peruvian Andes* (Pitcher, W. S, et al., eds.), 108–118. Blackie, Glasgow & London.
- Nazari, A.M., Ghahreman, A., Bell, S. (2017). A comparative study of gold refractoriness by the application of QEMSCAN and diagnostic leach process. *International Journal of Mineral Processing*, 169, 35-46.
- Palacios Moncayo, O.; Sanches Fernandez, A.; Herrera Romero, F. (1995). Serie A: Carta geológica nacional. Boletín nº 55.
- Palacios, S. (2011). Caracterización del yacimiento de oro de Misky, sur del Perú.
- Parga, J. R. (Instituto T. de S. 1996). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata en minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, 32(c), 254-261.
- Pitcher, W. S. (1985). A multiple and composite batholith. *Magmatism at the plate edge: The Peruvian Andes*: Glasgow, UK, Blackie, 93-101.
- Prieto, I. F., & Gadea, I. S. (2002): Aplicaciones de la proyección estereográfica en ingeniería geológica. *Ingegraf*, (1), 1-10

- Rodríguez Sastre, M. A. (2003). Materiales pizarrosos del sinclinal de Truchas (León-Orense).
- Santos Cisneros, J. M. (2009). Controles geológicos-estructurales de la mineralización aurífera en el sistema de vetas de la mina Orión Chala, Arequipa.
- UNE-EN 1926 (1999). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión.
- UNE 22950-5 (1996). Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 5: resistencia a carga puntual.
- Vallejo, L. I. et al. (2002). Ingeniería Geológica. Pearson Edición. Madrid, 2002.
- Yáñez González, J.A. (2013). Problemática asociada al uso del mercurio para la recuperación de oro en la minería artesanal de Cháparra, sur de Perú.
- Zhang, J., Zhang, Y.; Richmond, W., Wang, H. (2010). Processing technologies for gold-telluride ores. *International journal of minerals, metallurgy and materials*. Vol. 17 num. 1.

## Anexos

### Anexo 1: Listado de muestras, ubicación y estudio realizado

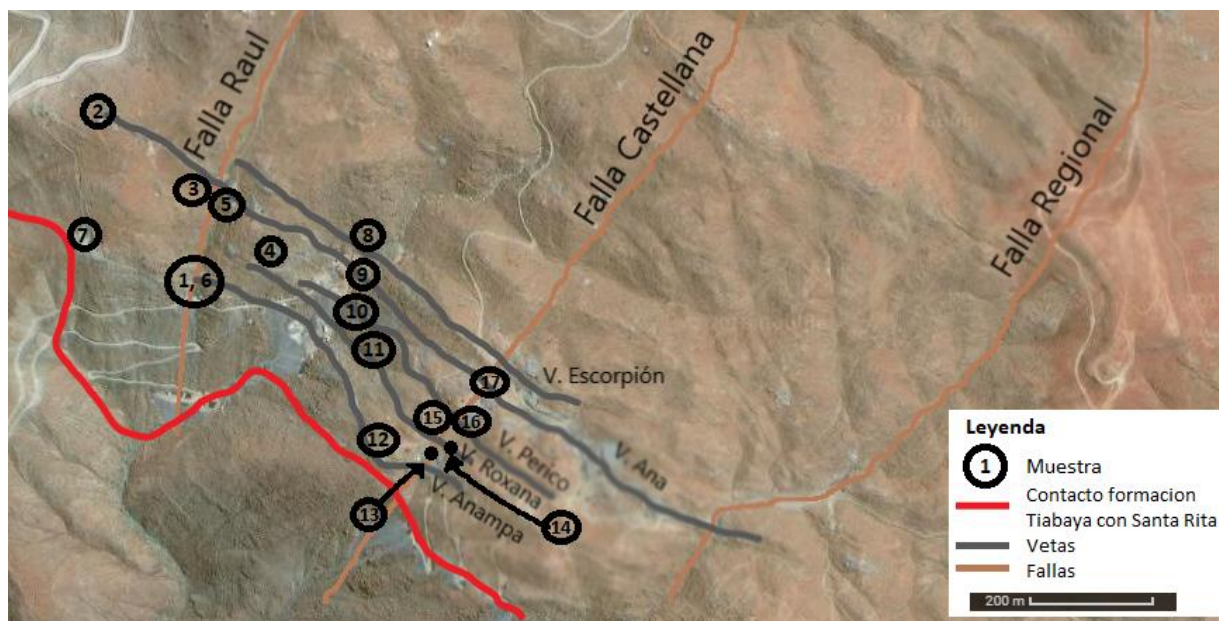


Fig. 1 – Mapa de la ubicación de las muestras en superficie

Tabla 1 – Listado de muestras tomadas

Nº	Muestra	Latitud	Longitud	Altura	Observaciones	Análisis
1	FDM-08	277344	8301224	2391	Muestra de la zona (veta Anampa): epidota y cuarzo	
2	FDM-11	577486	8301210	2400	Veta Ana	Au
3	FDM-12	577536	8301183	2378	Paniso(cuarzo) más algo de oro /Cuarzo ahumado (verde, blanco)	DRX
4	FDM-02	577554	8301178	2371	Interior de veta Ana: cuarzo, hematites, cuarzo ahumado	
5	FDM-01	577536	8301183	2378	Veta Ana: Paniso, similar a la hematita	DRX
6	FDM-03	577344	8301224	2391	Veta Anampa: cuarzo	Au
7	FDM-14	577268	8301037	2360	Zona de contacto de Tiabaya con Santa Rita	
8	FDM-22	577867	8300967	2367	Calcopirita, Cobre y Malaquita. Veta Escorpión 305°/78°	
9	-	577840	8300938	2356	Veta Ana: 300°/60° con 40cm de potencia. A 100m la veta comunica, no es recta. Familia de discontinuidades 220°/66°	Au

10	-	577873	8300868	2381	Veta Perico: 290°/61°. 20cm de potencia	
11	FDM-20	577869	8300250	2381	Veta Roxana: 290°/58°. Entre 5cm a 15cm de potencia. Muestra de mina	
12	FDM-18	577793	8300781	2360	Muestra de borde de Santa Rita con Tiabaya. Caminando varios metros siguiendo la veta encuentras roca volcánica. Muestra de dique porfirico de la falla castellana y calcita.	
13	FDM-17	577852	8300716	2381	Restos de la veta. Al lado de un pozo con skiper. Ley baja. Veta Roxana	
14	FDM-06	577871	8300732	2387	Pozo de 150m siguiendo la falla de 303°/60°. Entre 17 y 18m de potencia. Veta Roxana Split	
15	FDM-21	577871	8300732	2387	Dique andesitico de la falla Castellana 300°/70° 1,10m	AQ, DRX
16	FDM-19	577914	8300741	2389	Veta Perico. Muestra de parte alta de la veta	
17	FDM-07	5777972	8300826	2371	Veta Ana 310°/68°. Parte alta de la veta, muestra mineral.	
	FDM-27				Muestra de veta Ana Interior Mina	
	-				Roca encajante alterada veta Perico	
	FDM-26				Muestra de la roca encajante de la veta Ana con transversal de la veta Perica	
	FDM-05				muestra de la veta ana, entrada mina	
	-				Muestra de la medición de diacласas en la veta Ana: Paniso. Duda si es de la diacласa o falla. Misma falla Z1 y Z4	
	FDM-15				Muestra Escorpión superficie	Au
	FDM-09				Muestra veta Perica: cuarzo más sulfuros	
	FDM-10				Muestra de cuarzo	
	FDM-16				Veta Ana: Planta no triturada	Au
	FDM-13				Andesita volcánica de la Falla Rita	
	FDM-23				Caja de la veta Ana	
	FDM-24				Muestra de hematites	
	FDM-25				Granodiorita más sulfuros de la zona de la planta	AQ
	FDM-04				Muestra de Paniso del interior de falla	DRX
	FDM-28				Muestra de cuarzo del interior	

**Anexo 2: Lista de discontinuidades**

Lista de discontinuidades de FIDAMI					
Dirección	Buzamiento		Dirección	Buzamiento	
125	17	SW	195	75	E
130	29	SW	195	75	E
130	39	E	300	60	NE
140	30	SW	300	55	NE
147	29	E	301	54	NE
150	70	E	304	60	NE
150	32	SW	305	26	NE
151	15	SW	312	28	NE
158	42	E	326	58	NE
158	26	SW	328	53	NE
170	59	SW	330	70	NE
170	59	SW	330	65	NE
173	80	E	334	61	NE
173	80	E	338	26	NE
179	60	SW	342	55	NE
179	60	SW	342	59	NE
180	80	E	346	60	NE
180	80	E	347	56	NE
180	80	SW	349	65	NE
180	80	E	354	63	NE
183	76	E	358	42	NE
183	76	E	361	45	NE
185	71	E	368	70	NE
185	63	SW	371	70	NE



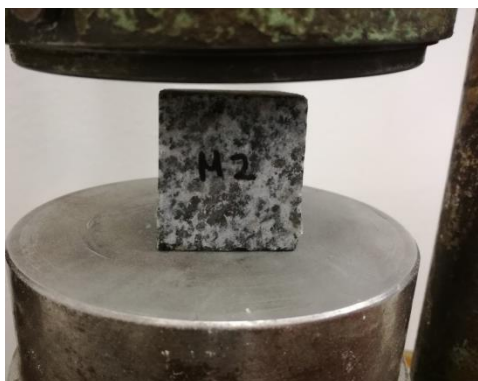
### Anexo 3: Resultados compresión simple

#### Ensayos en laboratorio de Optimore, EPSEM.

Muestra M1:



Muestra M2:



Muestra M3:





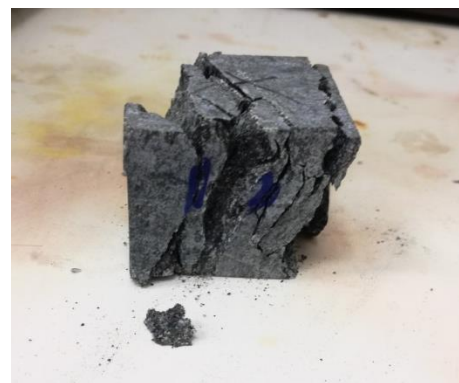
Muestra M4:



Muestra M5:



Muestra M10:



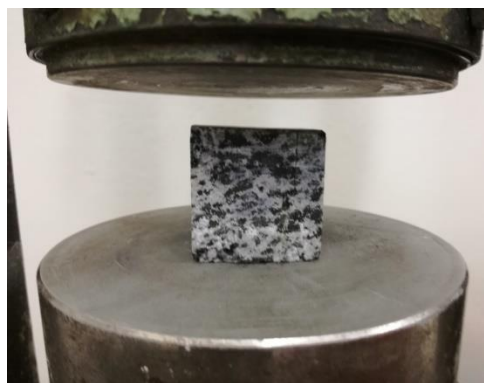
Muestra 91:



Muestra 92:



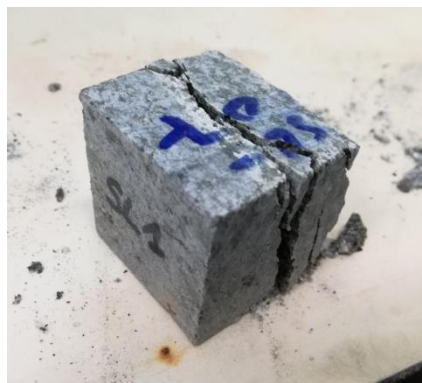
Muestra 93:



Muestra 94:



Muestra SL1:





Muestra SL2:



Muestra SL3:



Muestra SL4:



Resultados compresión simple a partir de la fuerza registrada por la prensa y las medidas de la cara contigua a la prensa.

Muestra	Superficie (cm2)	Fuerza (T)	Resistencia compresión (MPa)
M1	11,98	12,3	100
M2	11,87	5,9	49
M3	10,45	8,0	75
M4	11,28	6,0	52
M5	12,09	4,1	33
M10	15,60	19,0	119
91	17,09	18,6	107

92	15,72	23,5	147
93	16,00	22,0	135
94	16,88	18,0	105
SL1	10,68	5,5	51
SL2	11,59	5,0	42
SL3	12,96	9,0	68
SL4	13,94	12,9	91

Las muestras 91, 92, 93 y 94 pertenecen a la misma roca. Lo mismo para el caso de las muestras SL1, SL2, SL3 y SL4.

### Ensayos en laboratorio en UPC Campus Norte.

M8



M9



M10



#### Anexo 4: Resultados carga puntual: ensayos en laboratorio de Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

##### Ensayo 1:

Resultados de la carga puntual de los bloques rectangulares (Tabla 1).

**Tabla 1 – Resultados carga puntual de bloques rectangulares**

Muestra	Bloque			Carga(N)
	Ancho (W) (cm)	Alto (D)(cm)	Largo(L)(cm)	
V.S. 1	4,02	4,11	6,00	14,484
V.S. 2	3,50	4,11	6,05	14,764
V.S. 3	4,11	4,20	6,58	15,198
Ramal	4,20	4,31	6,49	3,560

A continuación, en la Fig. 1 se puede observar los bloques antes de aplicar la carga puntual y en la Fig. 2 se observan los bloques después de aplicar la carga puntual.



**Fig. 1**



**Fig. 2**

##### Ensayo 2:

Resultados de la carga puntual de los cilindros de sondeo tramo 6 (Tabla 2).

**Tabla 2 – Resultados carga puntual de sondeo tramo 6**

Muestra	Core		Carga(N)
	D(cm)	L(cm)	
6.1	4,77	4,74	21,416
6.2	4,77	4,80	17,620
6.3	4,77	4,85	26,672



A continuación, en la Fig. 3 se puede observar los bloques antes de aplicar la carga puntual y en la Fig. 4 se observan los bloques después de aplicar la carga puntual.



Fig. 3



Fig. 4

### Ensayo 3:

Resultados de la carga puntual de los cilindros de sondeo tramo 5 (Tabla 3).

Tabla 3 – Resultados carga puntual de sondeo tramo 5

Muestra	Core		Carga(N)
	D(cm)	L(cm)	
5.1-A	4,72	4,91	19,160
5.2-A	4,72	4,81	21,572
5.3-A	4,72	4,80	24,722

A continuación, en la Fig. 5 se puede observar los bloques antes de aplicar la carga puntual y en la Fig. 6 se observan los bloques después de aplicar la carga puntual.



Fig. 5



Fig. 6



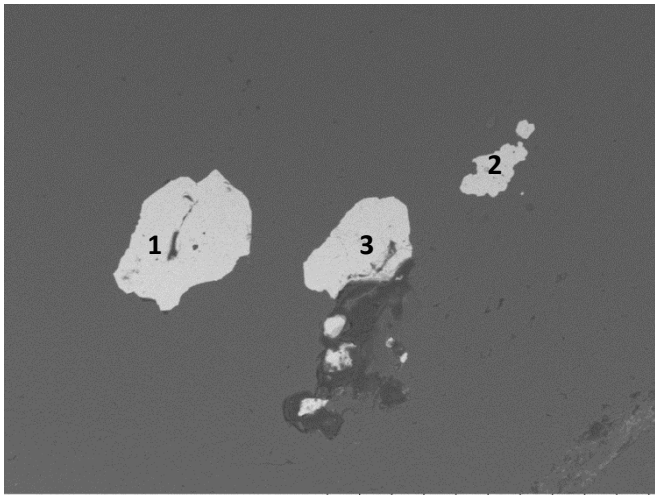
## Anexo 5: Listado de probetas

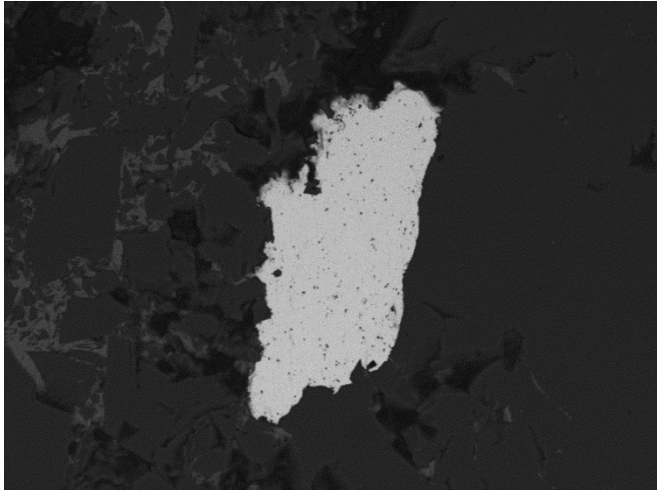
A continuación se observa las probetas realizadas en el laboratorio de minas de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa sobre las muestras extraídas de la mina de FIDAMI y de la mina de San Luis.

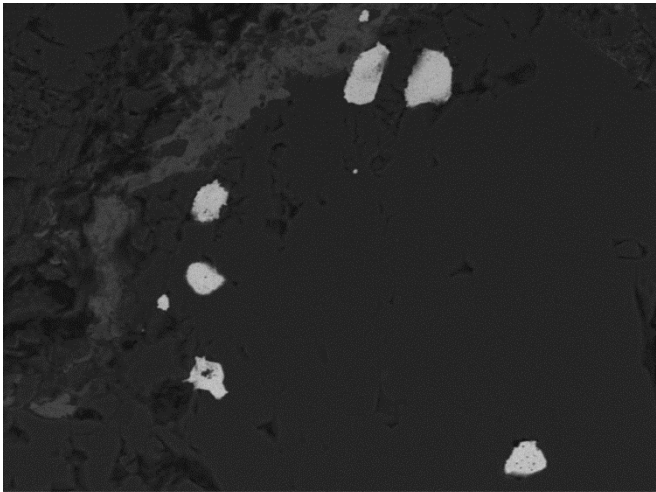
FDM-09	FDM-12	FDM-14
		
FDM-16	FDM-17	FDM-27
		
FDM-28	SL-01	SL-09
		
SL-13		
		

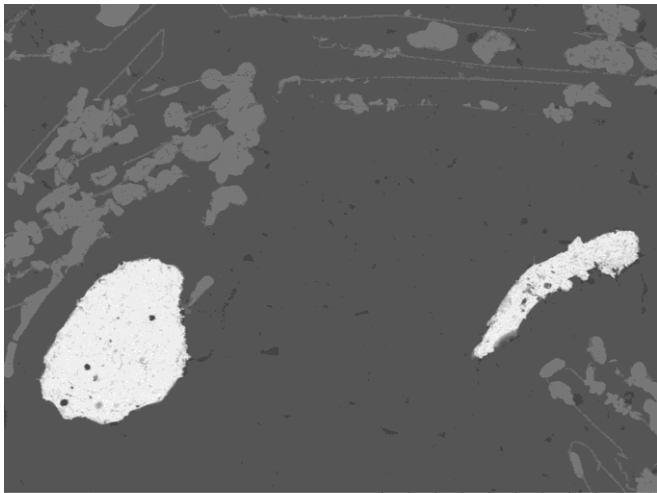
## Anexo 6: Microscopia electrónica

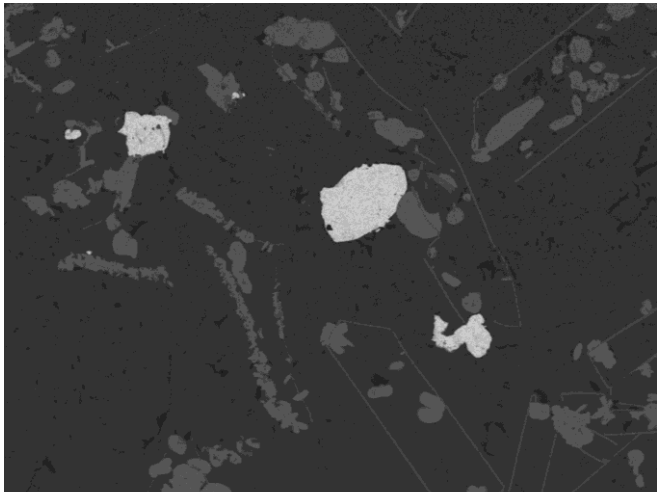
A continuación se muestran los resultados de la microscopia electrónica en las probetas realizadas:

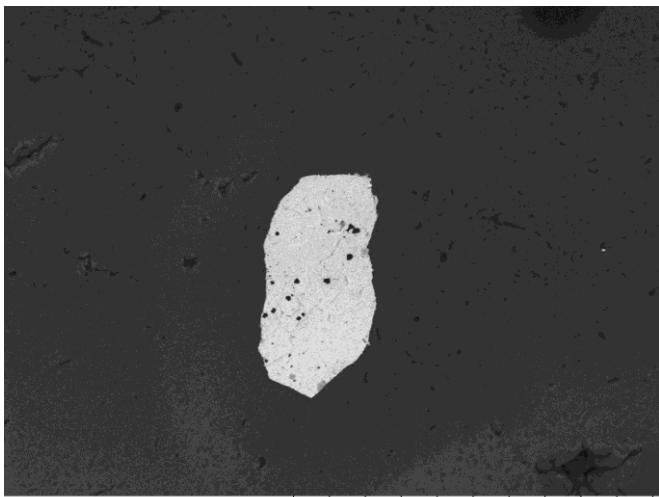
Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-09-01
Observaciones:	Cuarzo con Celestita (1 y 2) y Wolframita (3).	
 <p>D9,3 x300 300 um</p>		

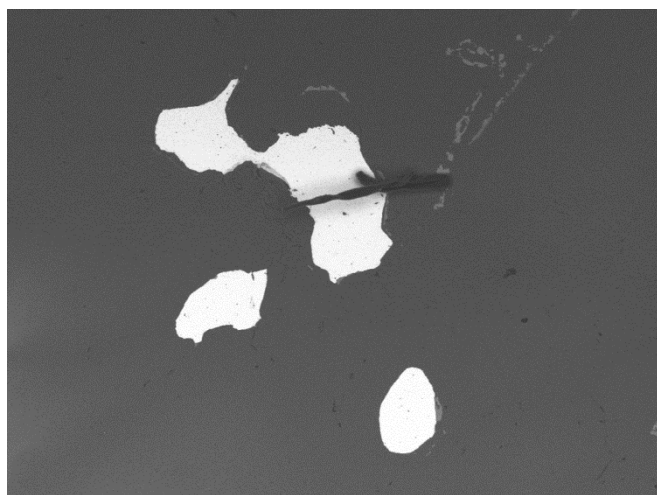
Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-17-01
Observaciones:	Cuarzo con Oro	
<div><p>D7,9 x1,0k 100 um</p></div>		

Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-17-02
Observaciones:	Oro , cuarzo y zonas de óxidos (zona grisácea)	
<div><p>D7,9 x1,0k 100 um</p></div>		

Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-28-01
Observaciones:	Oro	
 <p>D7,7 x1,5k 50 um</p>		

Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-28-02
Observaciones:	Oro	
<div><p>D7,7 x1,0k 100 um</p></div>		

Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-28-03
Observaciones:	Oro	
<div><p>D7,8 x1,0k 100 um</p></div>		

Microscopia electrónica, numero de probeta:		FDM-28-04
Observaciones:	Oro	
<div></div> <div>D7,4 x200 500 um</div>		